

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN-TARAPOTO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

DEPARTAMENTO ACADÉMICO AGROSILVO PASTORIL

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMÍA



TESIS

**DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE CADMIO Y PLOMO
EN GENOTIPOS DE CACAO (*Theobroma cacao* L.), PARA EL
ESTABLECIMIENTO DE PLANTACIONES COMERCIALES.**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÓNOMO

PRESENTADO POR:

JIMMY WILQUERSON CHUPILLÓN CUBAS

**TARAPOTO – PERÚ
2017**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN-TARAPOTO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

DEPARTAMENTO ACADÉMICO AGROSILVO PASTORIL

ESCUELA PROFESIONAL DE AGRONOMIA

ÁREA DE SUELOS Y CULTIVOS

TESIS


**DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE CADMIO Y PLOMO EN
GENOTIPOS DE CACAO (*Theobroma cacao* L.), PARA EL
ESTABLECIMIENTO DE PLANTACIONES COMERCIALES.**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AGRÓNOMO**

COMITÉ DE TESIS


.....
Dr. Jaime Walter Alvarado Ramírez
PRESIDENTE


.....
Ing. M.Sc. Armando Duval Cueva Benavides
SECRETARIO


.....
M.Sc. Segundo Darío Maldonado Vásquez
MIEMBRO


.....
Ing. Dr. Carlos Rengifo Saavedra
ASESOR



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN – TARAPOTO

Unidad de bibliotecas especializadas y biblioteca central

FORMULARIO DE AUTORIZACIÓN NO EXCLUSIVO PARA PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA EN REPOSITORIO DIGITAL

1. DATOS PERSONALES

Apellidos y Nombres: Chupillón Cubas Jimmy Wilquerson		DNI: 73446744
Domicilio: Jr. Los andes N° 916 – Morales – Tarapoto – San Martín		
Teléfono: 976657146	Correo Electrónico: chupilloncubas.0610@gmail.com	

2. DATOS ACADÉMICOS

Facultad	: CIENCIAS AGRARIAS
Escuela Académica Profesional: AGRONOMÍA	

3. DATOS DE LA TESIS

Título: "DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE CADMIO Y PLOMO EN GENOTIPOS DE CACAO (<i>Theobroma cacao</i> L.), PARA EL ESTABLECIMIENTO DE PLANTACIONES COMERCIALES"
Año de Publicación 2017

4. AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN EN VERSIÓN ELECTRÓNICA

A través de la presencia autorizo a la Unidad de Biblioteca Especializadas y Biblioteca Central – UNSM – T, para que publique, conserve y sin modificarla su contenido, pueda convertir a cualquier formato de fichero, medio o soporte, siempre con fines de seguridad, preservación y difusión en su Repositorio Institucional su obra a texto completo el citado título (Resolución Rector N° 212-2013-UNSM/CU-R).

JIMMY WILQUERSON CHUPILLÓN CUBAS

DNI: 73446744

Fecha de recepción: 03 / 10 / 2017

Formato de autorización NO EXCLUSIVA para la publicación de trabajos de investigación, conducentes a optar grados académicos y títulos profesionales en el Repositorio Digital de Tesis

1. Datos del autor:

Apellidos y nombres: JIMMY WILQUERSON CHUPILLÓN CUBAS	
Código de alumno: 111104	Teléfono: 976657146
Correo electrónico: chupilloncubas.0610@gmail.com	DNI: 73446744

(En caso haya más autores, llenar un formulario por autor)

2. Datos Académicos

Facultad de: Ciencias Agrarias
Escuela Académico Profesional de: Agronomía

3. Tipo de trabajo de investigación

Tesis	(X)	Trabajo de investigación	()
Trabajo de suficiencia profesional	()		

4. Datos de trabajo de investigación

Título: DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE CADMIO Y PLOMO EN GENOTIPOS DE CACAO (<i>Theobroma cacao</i> L.), PARA EL ESTABLECIMIENTO DE PLANTACIONES COMERCIALES
Año de publicación: 2017

5. Tipo de Acceso al documento

Acceso público *	(X)	Embargo	()
Acceso restringido **	()		

Si el autor elige el tipo de acceso abierto o público, otorga a la Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto, una licencia **No Exclusiva**, para publicar, conservar y sin modificar su contenido, pueda convertirla a cualquier formato de fichero, medio o soporte, siempre con fines de seguridad, preservación y difusión en el Repositorio de Tesis Digital. Respetando siempre los Derechos de Autor y Propiedad Intelectual de acuerdo y en el Marco de la Ley 822.

En caso que el autor elija la segunda opción, es necesario y obligatorio que indiquen el sustento correspondiente:

6. Originalidad del archivo digital

Por el presente dejo constancia que el archivo digital que entrego a la Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto, como parte del proceso conducente a obtener el Título Profesional o Grado Académico, es la versión final del trabajo de investigación sustentado y aprobado por el jurado.

7. Otorgamiento de una licencia *CREATIVE COMMONS*

Para investigaciones que son de acceso abierto se les otorgó una licencia *Creative Commons*, con la finalidad de que cualquier usuario pueda acceder a la obra, bajo los términos que dicha licencia implica.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>

El autor por medio de este documento, autoriza a la Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto, publicar su trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Digital de Tesis, al cual se podrá acceder, preservar y difundir de forma libre y gratuita, de manera íntegra a todo el documento.

Según el Inciso 12.2, del Artículo 12° del Reglamento Nacional de Trabajos de Investigaciones para optar Grados Académicos y Títulos Profesionales –RENATI “Las universidades, instituciones y escuelas de educación superior tienen como obligación registrar todos los trabajos de investigación y proyectos, incluyendo los metadatos en sus repositorios institucionales precisando si son de acceso abierto o restringido, los cuales serán posteriormente recolectados por el Repositorio Digital RENATI, a través del Repositorio ALICIA”.

Firma del Autor

8. Para ser llenado por la Biblioteca Central o Especializada

Fecha de recepción del documento por el Sistema de Bibliotecas:

03 / 10 / 2017



Prof. Alicia Mercedes Grández Chávez
JEFE DE LA UNIDAD DE BIBLIOTECA CENTRAL

Firma de Unid. de Biblioteca

***Acceso abierto:** uso lícito que confiere un titular de derechos de propiedad intelectual a cualquier persona, para que pueda acceder de manera inmediata y gratuita a una obra, datos procesados o estadísticas de monitoreo, sin necesidad de registro, suscripción, ni pago, estando autorizada a leerla, descargarla, reproducirla, distribuirla, imprimirla, buscarla y enlazar textos completos (Reglamento de la Ley No 30035).

****Acceso restringido:** el documento no se visualizará en el Repositorio.

DEDICATORIA

"A Dios por darme la libertad de
vivir y permitirme cumplir una de
mis metas en mi vida"

"A mi mamá Josefa Cubas Villanueva,
por enseñarme su honestidad,
humildad y fortalecer siempre mi
corazón, por su amor de madre y su
infinita comprensión. A mi papá Tomas
Felipe Chupillon Huancaruna, por su
gran apoyo que me brindo y sus
consejos invaluables que fortalecen mi
corazón y encaminan mi vida"

"A mi hermana Guin Jesús y
hermano Harvey Fisher, por sus
apoyo incondicional a mi día a día
y por el hermoso regalo de existir
en mi vida"

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto y docentes de Agronomía que contribuyeron en mi formación profesional y en el desarrollo de mi tesis.

Al Instituto de cultivos tropicales (ICT), por brindarme las facilidades de sus instalaciones para llevar a cabo mi tesis, y por comprometerse siempre para el desarrollo de nuevas investigaciones y tecnologías para el mejoramiento de la agricultura.

A mi co-asesor Ing. M.Sc. Cesar Arévalo Hernández, por dedicar su tiempo y conocimientos para guiarme, y el excelente asesoramiento recibido, además de ser un gran amigo por darme respuesta a muchas interrogantes.

Agradecer infinitamente a toda la familia ICT, en especial al Ing. Dr. Enrique Arévalo Gardini por su apoyo incondicional brindándome las facilidades del laboratorio para poder trabajar la presente tesis y a mis grandes amigos y compañeros de trabajo Juan Arévalo, Abel Farfán, Lucinda Vela y Ronal Garcia, por ser ante todo cada uno amigos incondicionales de gran espíritu y calidad humana.

Muchas gracias a todas las personas que siempre me apoyaron en mi formación profesional y los que me ayudaron a realizar mi tesis, por su colaboración y apoyo desinteresado.

ÍNDICE

Pag.

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

SUMMARY

I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	2
2.1. Objetivo general	2
2.2. Objetivos específicos	2
III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
3.1. Metales pesados	3
3.2. Contaminación del cacao con cadmio y plomo.	3
3.3. Toxicidad de los metales pesados	5
3.4. Movilidad de los metales pesados en el suelo	6
3.6. Antecedentes en la investigación.....	8
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
4.1. Materiales.....	10
4.1.1. Material genético.....	10
4.1.2. Metales pesados	10
4.2. Ubicación del campo experimental	10
4.3. Diseño del experimento	10
4.4. Análisis estadístico	11
4.5. Conducción del experimento	12
4.5.1. Preparación de sustrato	12
4.5.2. Recolección de mazorcas y siembra de genotipos	13

4.5.3. Aplicación de metales pesados (Cadmio y Plomo)	14
4.5.4. Otras actividades	15
4.5.5. Indicadores de las variables biométricas	15
4.5.6. Indicadores de las variables de laboratorio	17
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
5.1. Altura de planta	19
5.2. Diámetro de tallo	22
5.3. Número de hojas	25
5.4. Área foliar y radicular	28
5.5. Materia seca	30
5.6. Análisis de Cadmio y Plomo	33
VI. CONCLUSIONES.....	46
VII. RECOMENDACIONES	47
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
ANEXOS.....	52

ÍNDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1: Descripción de los tratamientos en estudio	11
Tabla 2: Análisis de suelo	12
Tabla 3: Análisis de varianza (P-valor) de altura de planta.....	19
Tabla 4: Promedios del desarrollo de altura de plantas de cacao	20
Tabla 5: Análisis de varianza (P-valor) de diámetro de tallo	22
Tabla 6: Promedios del desarrollo de diámetro de plantas de cacao.....	23
Tabla 7: Análisis de varianza (P-valor) de número de hojas.....	25
Tabla 8: Promedios del número de hojas de plantas de cacao	26
Tabla 9: Análisis de varianza (P-valor) del área foliar y radicular	28
Tabla 10: Promedio del área foliar y radicular de genotipos de cacao.....	29
Tabla 11: Análisis de varianza (P-valor) de materia seca foliar y raíz.....	31
Tabla 12: Promedio de materia seca foliar y radicular.....	31
Tabla 13: Análisis de varianza (P-valor) de análisis de cadmio	33
Tabla 14: Promedio del análisis de cadmio en la parte foliar y raíz	34
Tabla 15: Análisis de varianza (P-valor) de análisis de plomo.....	37
Tabla 16: Promedio del análisis de plomo en la parte foliar.....	38
Tabla 17: Promedio del análisis de plomo de la comparación genotipo – cadmio en la raíz.	40
Tabla 18: Promedio del análisis de plomo de la comparación genotipo – plomo en la raíz	41
Tabla 19: Promedio del análisis de plomo en la comparación cadmio – plomo en la raíz.	42

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1: Preparación de sustrato	12
Figura 2: Recolección de mazorcas de cacao	13
Figura 3: Mazorcas de cacao	13
Figura 4: Siembra de semillas pre-germinado	14
Figura 5: Aplicación de metales pesados	14
Figura 6: Altura de planta	15
Figura 7: Diámetro de tallo	16
Figura 8: Número de hojas.....	16
Figura 9: Calculo de área foliar y radicular..	17
Figura 10: Pesado de muestras y secado..	18
Figura 11: Análisis de cadmio y plomo..	18
Figura 12: Altura de plantas de cacao con cinco periodos de evaluación.....	21
Figura 13: Diámetro de tallo de plantas de cacao con cinco periodos de evaluación.	24
Figura 14: Número de hojas de plantas de cacao con cinco periodos de evaluación.	27
Figura 15: Comparación de medias del área foliar.	29
Figura 16: Comparación de medias del área radicular.	30
Figura 17: Comparación de medias de materia seca de la parte foliar.	32
Figura 18: Comparación de media de materia seca de la raíz.....	32
Figura 19: Comparación de medias del análisis de cadmio de la parte foliar.	35
Figura 20: Comparación de medias del análisis de cadmio en la raíz.	36
Figura 21: Comparación de medias del análisis de plomo de la parte foliar.	39
Figura 22: Comparación de medias, Genotipo – Cadmio del contenido de plomo en la raíz.	40
Figura 23: Comparación de medias, Genotipo – Plomo del contenido de plomo en la raíz.	42
Figura 24: Comparación de medias, Cadmio – Plomo del contenido de plomo en la raíz.	43

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pag.
Anexo 1: Diseño de ordenamiento de la siembra por genotipo	52
Anexo 2: Análisis de varianza de altura de planta	53
Anexo 3: Análisis de varianza de diámetro de tallo	54
Anexo 4: Análisis de varianza de número de hojas	55
Anexo 5: Análisis de varianza del área foliar y radicular.....	56
Anexo 6: Análisis de varianza de materia seca foliar y raíz	56
Anexo 7: Análisis de varianza de Cadmio de la parte foliar y raíz	57
Anexo 8: Análisis de varianza de Plomo de la parte foliar y raíz	57
Anexo 9: Análisis de varianza de la parte raíz por la parte aérea	58
Anexo 10: Genotipo de cacao IMC-67 a los 110 días	58
Anexo 11: Genotipo de cacao POUND-12 a los 110 días	59
Anexo 12: Genotipo de cacao SCA-6 a los 110 días.....	59
Anexo 13: Genotipo de cacao EET-400 a los 110 días	60
Anexo 14: Genotipo de cacao CCN-51 a los 110 días	60
Anexo 15: Cacao común a los 110 días	61

RESUMEN

El cultivo de cacao absorbe metales pesados del suelo y los concentra en las partes vegetativas de la planta. En el presente trabajo de tesis se estudió seis genotipos de cacao y se identificó genotipos con baja capacidad de absorción de metales pesados (cadmio y plomo), en etapa de vivero. Se realizó en la Estación Experimental “Juan Bernito” del Instituto de Cultivos Tropicales, ubicado en la Banda de Shilcayo; provincia y departamento de San Martín. El diseño experimental utilizado fue de Bloques Completamente al Azar (DBCA), dispuesto en arreglo factorial de 2x2x6, con 5 repeticiones por tratamiento. Teniendo como factores a la aplicación de Cadmio (Con aplicación y sin aplicación), aplicación de Plomo (Con aplicación y sin aplicación) y 6 genotipos de cacao (IMC-67, POUND-12, SCA-6, EET-400, CCN-51 y Cacao común). Los indicadores de las variables biométricas (altura, diámetro y número de hojas) y laboratorio (área foliar y radicular, materia seca de la raíz y parte aérea, análisis de cadmio y plomo de la parte aérea y raíz). Los resultados indicaron que el cadmio y plomo no afectó en el desarrollo de altura (cm), diámetro (mm), número de hojas, área foliar (cm²) y radicular (cm²), materia seca de la raíz (g) y parte aérea (g), pero si ha presentado significancia en la absorción de cadmio y plomo por parte de los genotipos. Este estudio indica que los genotipos de cacao IMC-67 y POUND-12, han tenido baja capacidad de absorción de metales pesados, seguido del Cacao común.

Palabras claves: Cadmio, Plomo, Genotipos de cacao, absorción.

SUMMARY

Cocoa cultivation absorbs heavy metals from the soil and concentrates them in the vegetative parts of the plant. In the present work, six genotypes of cacao were studied and genotypes with low absorption capacity of heavy metals (cadmium and lead) were identified in the nursery stage. It was carried out in the Experimental Station "Juan Bernito" of the Institute of Tropical Cultures, located in the Band of Shilcayo; Province and department of San Martin. The experimental design used was Completely Random Blocks (DBCA), arranged in factorial arrangement of 2x2x6, with 5 repetitions per treatment. The application of lead (with application and without application) and 6 cacao genotypes (IMC-67, POUND-12, SCA-6, EET-400, CCN- 51 and Common Cocoa). The indicators of the biometric variables (height, diameter and number of leaves) and laboratory (leaf and root area, dry matter of root and shoot, cadmium and lead analysis of shoot and root). The results indicated that cadmium and lead did not affect the development of height (cm), diameter (mm), number of leaves, leaf area (cm²) and root (cm²), root dry matter (G), but it has had a significant effect on the absorption of cadmium and lead by the genotypes. This study indicates that the cocoa genotypes IMC-67 and POUND-12, have had low capacity of heavy metal absorption, followed by the common Cocoa.

Keywords: Cadmium, Lead, Cocoa genotypes, absorption.

I. INTRODUCCIÓN

El cacao (*Theobroma cacao* L.) está incrementando sus áreas de siembra y se debe al crecimiento de la demanda por este producto en Europa y América Latina. Las legislaciones vigentes de los principales consumidores de cacao, limitan la exportación del grano con altos niveles de metales pesados. Europa ha tomado la iniciativa del control sanitario del cacao y sus derivados, en una normativa que restringirá al cacao en su comercialización para el año 2019, con niveles superiores de 0,80 mg kg⁻¹ de Cd.

La planta de cacao absorbe metales pesados del suelo y los concentra en las semillas, hojas y raíces (Augstburger *et al.*, 2000). El cadmio y el plomo se encuentran de manera natural en la corteza terrestre en forma de minerales, de donde pueden ser absorbidos por las plantas y tomados de ellas por el ser humano (Prieto *et al.*, 2009).

Los metales pesados pueden estar de forma natural en el suelo o por contaminación antropogénica. La acumulación de metales pesados en las plantas de cacao y posteriormente en los granos, afecta su producción y por ende su comercialización, teniendo un problema para su exportación. El presente objetivo de este trabajo fue encontrar genotipos de cacao con baja capacidad de acumulación de cadmio y plomo, en etapa de vivero. Mediante este trabajo de investigación se ha probado seis genotipos de cacao, sembrados en suelos inducidos con cadmio y plomo para probar su absorción de estos metales pesados y se ha concluido que los genotipos de cacao IMC-67, POUND-12 y Cacao común han tenido menor capacidad de absorción de cadmio y plomo.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- Determinar genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) para la producción de plántones de cacao, con baja absorción de cadmio y plomo.

2.2. Objetivos específicos

- Evaluar los efectos de altura de planta, diámetro de tallo y número de hojas con relación a la acumulación de cadmio y plomo de plántones de cacao en etapa de vivero.
- Identificar genotipos de cacao con baja capacidad de absorción de metales pesados (cadmio y plomo), para la producción de plántones de cacao en etapa de vivero.

III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. Metales pesados

El término “Metal pesado” se ha utilizado durante muchos años y es generalmente reconocido como una referencia al grupo de los metales y metaloides de relativamente alta masa atómica ($> 5 \text{ g cm}^{-3}$) sobre todo los metales de transición, tales como Pb, Cd y Hg , que pueden causar graves problemas de toxicidad (Alloway, 2013). Los metales pesados también son esenciales para las plantas y / o animales y necesitan estar presentes en cantidades adecuadas (Alloway, 2013).

Los metales pesados, pueden ser contaminantes del aire, agua, suelo y las plantas cuando se absorben en altas concentraciones o se depositan en el suelo; en conjunto esta contaminación afecta a los demás eslabones de las cadenas tróficas. Desde el punto de vista biológico, se distinguen dos grupos, aquellos que no presentan una función biológica conocida y los que tienen una función biológica conocida (Ryan y Chaney, 1994; citado por Acosta, 2007). Los oligoelementos o micronutrientes se requieren en pequeñas cantidades, o cantidades traza, por las plantas y animales, todos ellos son necesarios para que los organismos completen su ciclo vital pero al superar cierto umbral, se vuelven tóxicos (Rubio *et al.*, 1996; citado por Acosta, 2007).

3.2. Contaminación del cacao con cadmio y plomo.

Los metales pesados en alimentos tienen múltiples orígenes. En el caso del cacao es posible que la contaminación del producto se dé en las etapas de cultivo, producción y transformación. Conocer el origen de la contaminación

en alimentos es fundamental para determinar las acciones a seguir y para establecer la calidad del producto (Martínez y Palacio, 2010).

Las concentraciones de metales pesados en los suelos están asociadas a los ciclos biológicos y geoquímicos y pueden alterarse por actividades antropogénicas como las prácticas agrícolas, el transporte, las actividades industriales y la eliminación de residuos, entre otros (Prieto *et al.*, 2009; citado por Martínez y Palacio, 2010). Los metales pesados también son peligrosos porque tienden a bioacumularse en diferentes sistemas vivos. La bioacumulación es definida, como un aumento en la concentración de una sustancia química en un organismo vivo en un periodo de tiempo, cuando se compara con la concentración de la sustancia en el ambiente (Kabata y Pendias, 2004; citado por Martínez y Palacio, 2010).

La exposición ambiental al cadmio, que llega a los alimentos, sólo se convirtió en un problema después de analizar que el síndrome de Itai-Itai en Japón, enfermedad ósea, era causada por el consumo de arroz contaminado con Cd, como resultado de la descarga incontrolada en la cuenca del río Jenzu (Clemens *et al.*, 2013; citado por Jiménez, 2015).

En general, la población está expuesta al cadmio principalmente por dos vías: la oral a través del agua e ingesta de comida contaminada con cadmio (hojas de vegetales, granos, cereales, frutas, vísceras animales y pescado). La segunda vía es a través de la inhalación de partículas de cadmio durante las actividades industriales en personas laboralmente expuestas, mientras

que en la población general, la inhalación y exposición es principalmente debida al humo de cigarro que contiene cadmio ya que los pulmones absorben fácilmente (Goyer, 1997 y Valko, 2005; citado por Nava y Méndez, 2011)

Las plantas expuestas a altos niveles de Cd causa la reducción en la fotosíntesis, la absorción de agua y la absorción de nutrientes y, en consecuencia, se observa clorosis, inhibición del crecimiento, pardeamiento de las puntas de las raíces y, finalmente, la muerte (Yadav, 2010, citado por Jiménez, 2015).

El plomo también es un contaminante ambiental altamente tóxico, su presencia en el ambiente se debe principalmente a las actividades antropogénicas como la industria, la minería y la fundición. En los suelos contaminados con plomo se suele encontrar también Cd y Zn por analogía entre sus propiedades y características metálicas (Hettiarachchi y Pierzynski, 2002; citado por Prieto, *et al.*, 2009)

3.3. Toxicidad de los metales pesados

La toxicidad producida por metales de transición en general, implica la neurotoxicidad, hepatotoxicidad y nefrotoxicidad (Stohs y Bagchi, 1995 citado por Benavides, Gallego y Tomaro, 2005). También los metales pesados pueden participar en una serie de procesos al incorporarse al suelo, llegando a acumularse en éste como resultado de reacciones químicas, vía procesos de absorción, solubilización, precipitación y cambios en sus estados de oxidación, o pueden estar presentes en tejidos vegetales, debido a la

asimilación por la planta. En consecuencia, el uso agrícola de estos suelos contaminados por metales pesados, aparentemente, desarrolla cultivos con buena producción, pero potencialmente peligrosos para el consumo humano y animal (Fergusson, 1990 y Vásquez *et al.*, 2001; citado por Balderas, Cajuste, Lugo y Vásquez, 2003).

La forma química de metales pesados en la solución del suelo depende del elemento, el pH y la presencia de otros iones (Hirsch, 1998 y Das *et al.*, 1997; citado por Benavides *et al.*, 2005). Los síntomas de toxicidad observados en las plantas en presencia de cantidades excesivas de metales pesados pueden ser debido a una serie de interacciones a nivel celular (Hall, 2002; citado por Benavides *et al.*, 2005).

La peligrosidad de los metales pesados es mayor en comparación a compuestos orgánicos por no ser química ni biológicamente degradables. Una vez emitidos, pueden permanecer en el ambiente durante varios años. Además, su concentración en los seres vivos aumenta a medida que son ingeridos por otros, por lo que la ingesta de plantas o animales contaminados puede provocar síntomas de intoxicación (CONSUMER, 2001; citado por Balderas *et al.*, 2003). La toxicidad de los metales pesados depende no sólo de su concentración, sino también de su movilidad y reactividad con otros componentes del ecosistema (Abollino *et al.*, 2002; citado por Solano, 2005).

3.4. Movilidad de los metales pesados en el suelo

La movilidad de los elementos traza es de suma importancia para su disponibilidad a través de los diferentes perfiles del suelo (Karczewska, 1996;

Ma; Uren, 1998; Wilcke *et al.*, 1998 y Burt *et al.*, 2003; citado por Solano, 2005). Dentro de ello se le reconoce al Cadmio como un contaminante extremadamente significativo debido a su alta toxicidad y la gran solubilidad en agua (Pinto *et al.*, 2004; citado por Benavides *et al.*, 2005). También Barceló y Poschenrieder (1990), mencionan que el cadmio es uno de los metales más peligrosos debido a su alta movilidad y la pequeña concentración a la que sus efectos sobre las plantas comienzan a aparecer.

Los metales pesados pueden ser retenidos en el suelo, pero también pueden ser movilizados en la solución del suelo mediante diferentes mecanismos biológicos y químicos (Yang *et al.*, 1998; Cataldo *et al.*, 1983 y Pagnanelli *et al.*, 2004; citado por Solano, 2005;).

La mayor o menor retención y/o movilidad depende de la acción combinada de varios factores, incluyendo la naturaleza del metal y su concentración en el suelo, factores ambientales y constituyentes del suelo (He *et al.*, 2005; citado por De Santiago, 2013).

Cualquier elemento que se acumule en el suelo, no necesariamente está disponible para la planta, ya que su absorción, depende de varios factores y características físico-químico del suelo como el pH, textura, materia orgánica, capacidad intercambio catiónico y potencial redox (Fitter y Hay, 2002). A pesar de la diferente movilidad de los iones metálicos en las plantas, el contenido de metal es generalmente mayor en las raíces que en la parte

aérea (Sanitá di Toppi y Gabrielli 1999; Blum 1997; Ramos *et al.*, 2002, citado por Benavides *et al.*, 2005).

La movilización de los metales pesados en el ambiente, suelos y en organismos, es una condición importante de sus características de bioacumulación, transferencia hacia otros organismos en la cadena trófica, su potencial toxico y sus efectos (Kevin *et al.*, 2001; citado por Acosta, 2007).

La absorción de metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso para la entrada de éstos en la cadena alimentaria. La absorción y posterior acumulación dependen en primera instancia del movimiento (movilidad de las especies) de los metales desde la solución en el suelo a la raíz de la planta (Kabata, 2000; citado por Prieto, González y Román, 2009).

3.6. Antecedentes en la investigación

Huamaní *et al.* (2012), han presentado un trabajo sobre la presencia de metales pesados en el cultivo de cacao orgánico, en las regiones de Huánuco y Ucayali, Perú. Donde se evaluaron los contenidos de cadmio y plomo en suelos y hojas de cacao en estas regiones. En los suelos se encontró únicamente deficiencia de potasio; mientras que en el tejido foliar se presentaron deficiencias de N, P, K, Mg y Zn. Con respecto a la presencia de metales pesados (Cadmio y plomo) se encontraron con un promedio de 0.53 a 3.02 mg kg⁻¹ en los suelos y en hojas fueron de 0.21 a 0.58 mg kg⁻¹ respectivamente. Así también, Chavez *et al.* (2015), realizaron un estudio de la concentración de cadmio en los granos de cacao en el Sur de Ecuador,

encontraron que el contenido de cadmio en los granos estuvo por encima del nivel crítico ($0,6 \text{ mg kg}^{-1}$), y disminuyó en el orden grano>cáscara>hojas. Gramlich *et al.* (2016), han realizado un trabajo en parcelas de cacao del norte y este de Honduras, y analizó concentraciones de cadmio en hojas, cáscara y granos de cacao, que fueron altamente correlacionados con valores de R^2 de 0,75 (granos/cáscara) y 0,49 (granos/hojas).

Garzón y Paulin (2006), en un trabajo de investigación determinó el desarrollo vegetativo de clones de cacao, y determinaron diferencias altamente significativas según clones de cacao que fueron evaluados las variables de altura y diámetro a los seis meses de edad, en lo que resultó el IMC-67 con 108 cm de altura y 2.1 cm de diámetro y el SCA-6 con 118 cm de altura y 2.0 cm de diámetro.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Materiales

4.1.1. Material genético

Se utilizaron los genotipos del grupo Forastero como el IMC-67, POUND-12, SCA-6, EET-400, CCN-51 y Cacao común.

4.1.2. Metales pesados

Se utilizó, Cloruro de cadmio (CdCl_2) y Nitrato de plomo ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$).

4.2. Ubicación del campo experimental

El experimento se desarrolló en la Estación Experimental “Juan Bernito” del Instituto de Cultivos Tropicales, ubicado en la Banda de Shilcayo; provincia y región de San Martín (Latitud Sur $06^\circ 30' 28''$; Longitud Oeste $76^\circ 00' 18''$; Altitud 333 m.s.n.m.m.). Periodo de ejecución, de Julio del 2016 a Marzo del 2017.

4.3. Diseño del experimento

Para la ejecución de este trabajo de investigación se utilizó el Diseño de Bloques Completamente al Azar (DBCA), dispuesto en arreglo factorial de $2 \times 2 \times 6$. Se utilizó el componente metales pesados para, Aplicación de Cadmio (Con aplicación y sin aplicación) y Aplicación de Plomo (Con aplicación y sin aplicación) y el componente genotipos de cacao (IMC-67, POUND-12, SCA-6, EET-400, CCN-51 y Cacao común); con 5 repeticiones por tratamiento. El esquema del diseño experimental es presentado en la tabla 1.

Tabla 1:
Descripción de los tratamientos en estudio

Genotipos	Cadmio	Plomo	Clave
IMC – 67	Si	Si	Cadmio Plomo
		No	Cadmio
	No	Si	Plomo
		No	Testigo
POUND – 12	Si	Si	Cadmio Plomo
		No	Cadmio
	No	Si	Plomo
		No	Testigo
SCA – 6	Si	Si	Cadmio Plomo
		No	Cadmio
	No	Si	Plomo
		No	Testigo
EET – 400	Si	Si	Cadmio Plomo
		No	Cadmio
	No	Si	Plomo
		No	Testigo
CCN – 51	Si	Si	Cadmio Plomo
		No	Cadmio
	No	Si	Plomo
		No	Testigo
Cacao común	Si	Si	Cadmio Plomo
		No	Cadmio
	No	Si	Plomo
		No	Testigo

4.4. Análisis estadístico

Los resultados fueron analizados por ANOVA y la aplicación de la prueba de Scott-Knott ($P < 0,05$), usando el software estadístico R, con la finalidad de determinar si existe diferencias significativas entre los valores de los resultados obtenidos.

4.5. Conducción del experimento

4.5.1. Preparación de sustrato

Se realizó con tierra agrícola y arena (3:1), el resultado del análisis de suelos de caracterización es presentado en la tabla 2. El sustrato se llenó en baldes de 5 kg. y se ordenó en el vivero conforme al diseño experimental (anexo 1).

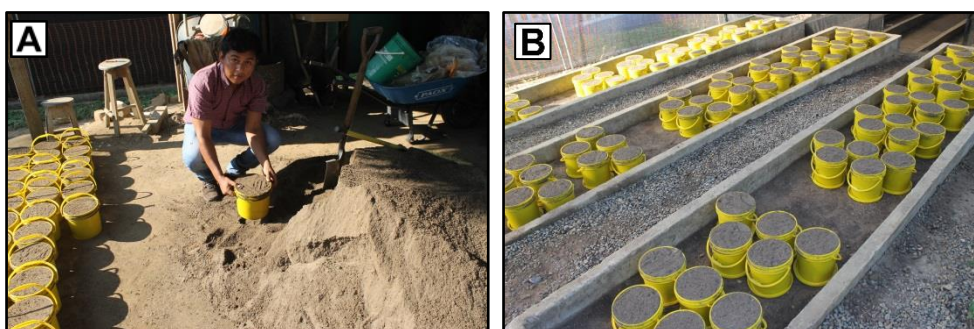


Figura 1: Preparación de sustrato. A. llenado de sustratos en baldes. B. Baldes ordenados según el diseño.

Tabla 2:
Análisis de suelo

Análisis Químico						
pH	CE (dS/m)	CaCO ₃ (%)	M.O (%)	N (%)	P (ppm)	K (ppm)
5.53	0.08	<0.3	2.17	0.10	6.95	28
CIC efectiva	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺ + H ⁺	
cmol/kg						
4.12	3.10	0.79	0.07	0.17	0.00	
Análisis Físico (%)		Arena	Limo	Arcilla	Clase Textural	
		74.24	5.28	20.48	Franco-Arenoso	

En la tabla 2, se detalla el análisis de suelo que presentó un pH (5,53) óptimo para el cacao, Materia orgánica (2,17 %) óptimo, Carbonatos (<0,3%) óptimo, Fósforo (6,95 ppm) bajo, Potasio (28 ppm) bajo, Calcio (3,10 cmol/kg) y Magnesio (0,79 cmol/kg) en un nivel medio.

4.5.2. Recolección de mazorcas y siembra de genotipos

Se recolectó 10 mazorcas de diferentes plantas para cada genotipo (IMC-67, POUND-12, SCA-6, EET-400, CCN-51 y Cacao común) de la estación experimental “Juan Bernito” y se realizó el pre-germinado y siembra de las semillas en las macetas.

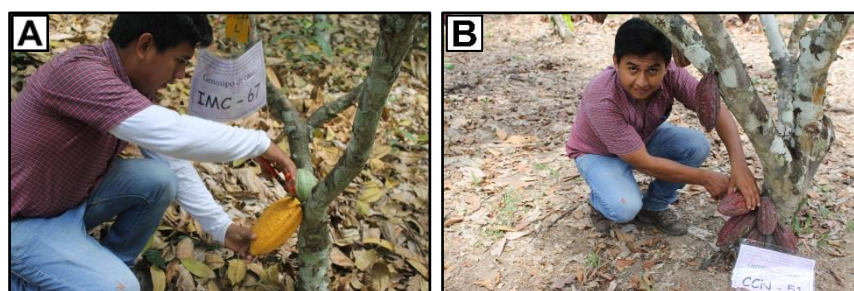


Figura 2: Recolección de mazorcas de cacao. A. Genotipo IMC-67. B. Genotipo CCN-51.



Figura 3: Mazorcas de cacao. A. IMC-67. B. POUND-12. C. SCA-6. D. EET-400. E. CCN-51. F. Cacao común.

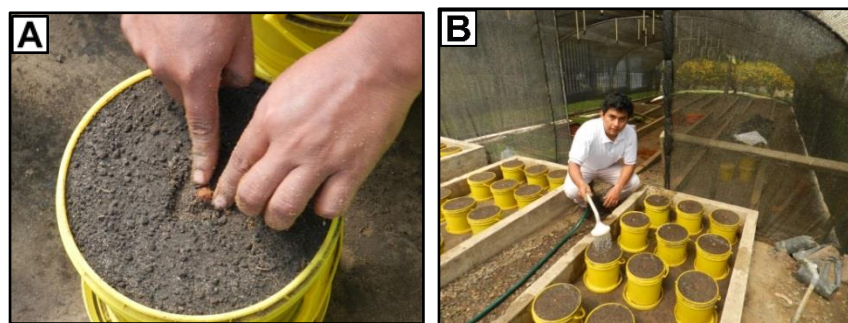


Figura 4: Siembra de semillas pre-germinado. A. Siembra de semilla. B. Riego después de la siembra.

4.5.3. Aplicación de metales pesados (Cadmio y Plomo)

Para la aplicación de Cd y Pb se utilizó Cloruro de cadmio CdCl_2 y Nitrato de plomo $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, respectivamente. Esto se aplicó en una concentración de 25 mg l^{-1} para Cd y Pb, realizado en dos dosis de 10 mg l^{-1} y uno de 5 mg l^{-1} , a los 66 días después de la siembra.

Se realizó una concentración de 5000 mg l^{-1} de cada metal pesado y de ello se extrajo un contenido de 0.4 ml . diluido en 200 ml . de agua destilada; para una dosis de 10 mg l^{-1} y 0.2 ml . diluido en 200 ml . de agua destilada para una dosis de 5 mg l^{-1} .

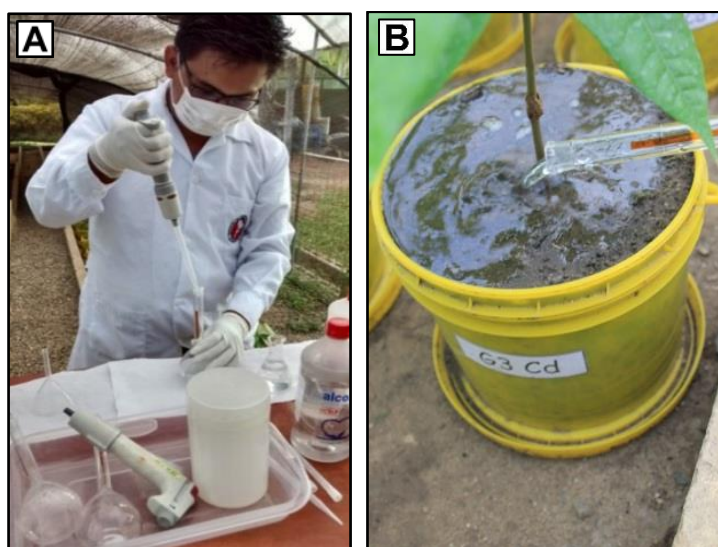


Figura 5: Aplicación de metales pesados. A. Dilución de Cadmio. B. Aplicación de cadmio

4.5.4. Otras actividades

El riego se realizó de forma permanente, en horas de la mañana. El control de insectos se realizó dos veces, por la incidencia de la plaga y se controló con *metomil*. Se presentó algunas deficiencias nutricionales, por lo que se aplicó fertilización foliar (macro y micro nutrientes).

4.5.5. Indicadores de las variables biométricas

Las variables biométricas ha consistido en la altura de planta, diámetro de tallo y número de hojas de cada planta, y esto se realizó a los 35, 65, 80, 95 y 110 días después de la siembra.

A. Altura de planta.

Se registró la altura desde la base del tallo hasta el ápice de la planta, con la ayuda de una regla milimetrada de 60 cm. Esto se realizó para cada unidad experimental.

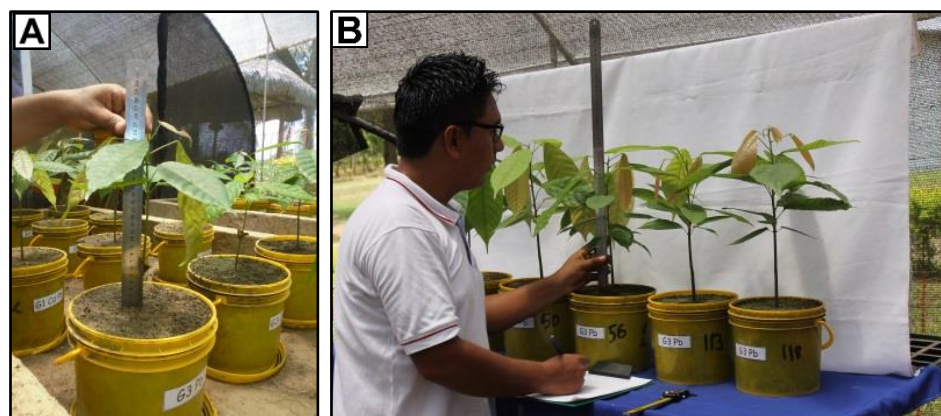


Figura 6: Altura de planta. A. Altura de planta a los 35 días. B. Altura de planta a los 110 días.

B. Diámetro de tallo.

Se midió el diámetro de tallo con la ayuda de un vernier digital y la medida se expresa en milímetros (mm).



Figura 7: Diámetro de tallo. A. Diámetro de tallo a los 35 días.
B. Diámetro de tallo a los 110 días.

C. Número de hojas.

Se contó el número de hojas por cada planta.



Figura 8: Número de hojas. A. Conteo de hojas a los 110 días.

4.5.6. Indicadores de las variables de laboratorio

Las variables de laboratorio consistió en el área, materia seca y análisis de cadmio y plomo de la parte foliar y radicular.

A. Área foliar y radicular.

La medición del área se realizó después del sacrificio de las plantas; previamente lavadas y secadas. Se utilizó el programa Assess 2.0 para medir el área foliar y radicular, lo que se expresó en cm^2 .

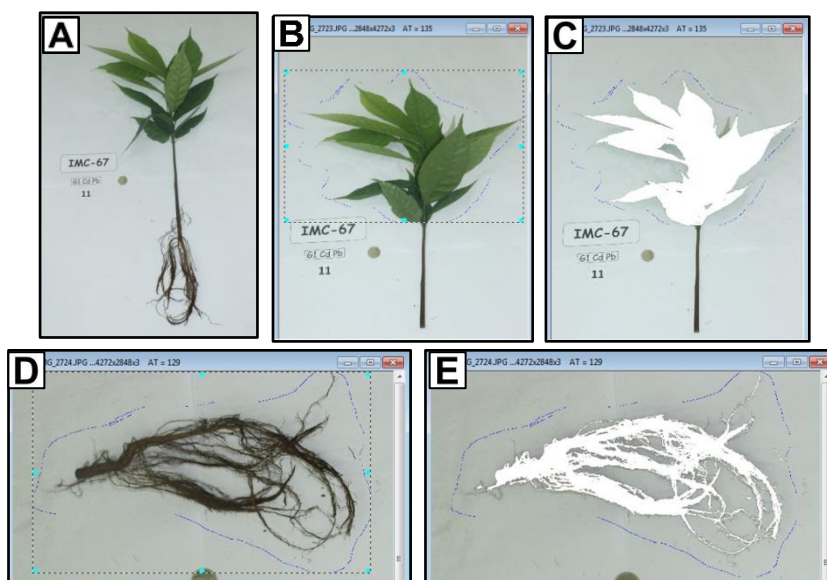


Figura 9: Calculo de área foliar y radicular. A. Muestra de planta para calcular el área. B. Parte aérea seleccionada para calcular el área. C. Área foliar. D. Parte radicular seleccionada para calcular el área. E. Área radicular.

B. Materia seca de raíz y parte aérea (combinación tallo y hoja)

Se cortó en el cuello de la raíz separando de la parte aérea (tallo y hoja) y se lavó con agua corriente. Se realizó un primer enjuague con ácido clorhídrico al 1% y luego con agua destilada. Se pesó la raíz y la parte aérea y se colocó en un sobre manila con su

respectivo código en la estufa a 60° grados por 72 horas y después se registró el peso seco y se expresó en gramos.

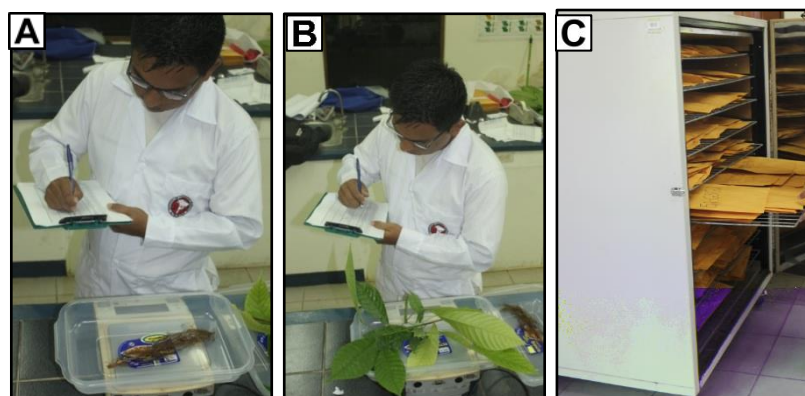


Figura 10: Pesado de muestras y secado. A. Pesado de raíz. B. Pesado de parte aérea. C. Muestras lavadas en ácido clorhídrico y agua destilada. D. Secado de muestras.

C. Análisis de metales pesados en tejidos vegetales.

Se trituraron las muestras de raíz y la parte aérea extrayendo de cada sobre manila, luego se recogió en una bolsa y se etiqueto con un código (Escrito en la bolsa con un plumón indeleble) y se analizó en el laboratorio químico – suelo del Instituto de Cultivos Tropicales. Para el análisis de tejidos vegetales, se realizó una digestión acida con ácido nítrico y ácido perclórico en relación 3:1 (Mark Millson y Ronnee Andrews, 2003). Después, la determinación de Cd y Pb se realizó en un espectrofotómetro de absorción atómica.

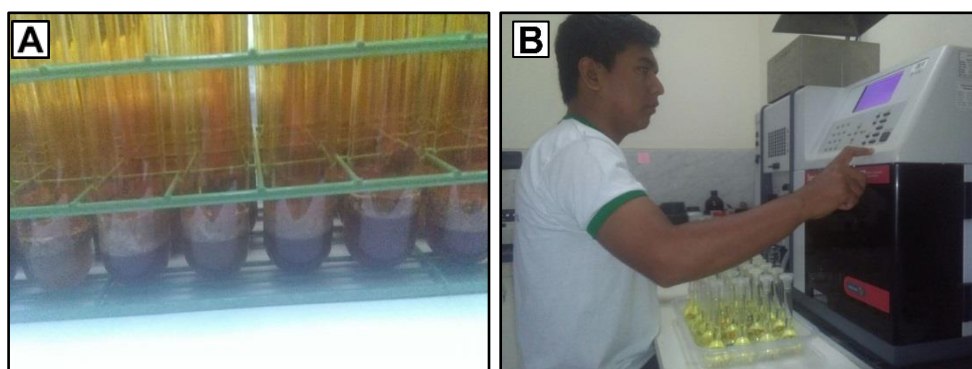


Figura 11: Análisis de cadmio y plomo. A. Digestión acida. B. Lectura en el espectrofotómetro.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Altura de planta

En el anexo 2, se muestra el análisis de varianza de crecimiento de las plantas de cacao evaluados a los 35, 65, 80, 95 y 110 días después de la siembra, se encontraron diferencias significativas en genotipos ($P \leq 0,05$).

En la tabla 3, se muestra el análisis de varianza (P -valor) de altura de planta. Para cadmio (Cd) y plomo (Pb) no se observaron diferencias significativas para los cinco periodos de evaluación; sin embargo, existieron diferencias significativas entre los genotipos evaluados a los 35, 65 y 80 días después de la siembra, y no significativo a los 95 y 110 días.

Tabla 3:
Análisis de varianza (P -valor) de altura de planta

F.V.	G.L.	P-valor de altura de planta				
		35 días	65 días	80 días	95 días	110 días
Cd	1	0,2681	0,6022	0,3970	0,2977	0,2459
Pb	1	0,9303	0,6879	0,9217	0,5128	0,8719
Genotipo	5	3,865E-05 *	0,0001142 *	0,003899 *	0,4491	0,3348
Cd x Pb	1	0,2258	0,3583	0,2973	0,8520	0,8159
Cd x Genotipo	5	0,8782	0,8246	0,7100	0,6290	0,4071
Pb x Genotipo	5	0,4767	0,4791	0,3391	0,3514	0,4944
Cd x Pb x Genotipo	5	0,4740	0,6445	0,5395	0,7283	0,3007
Error	96					
Total	119					

* Significativo al 5 % con el test F.

Así, en la figura 12, se observa el crecimiento de los genotipos en cinco periodos de evaluación, mostrando tener mayor altura a los 110 días el genotipo Cacao común con 34,8 cm, seguido del POUND-12 con 34,3 cm, SCA-6 con 33.8 cm, EET-400 con 33.7 cm, CCN-51 con 33.1 cm y el IMC-67 con 31.3 cm. Estos promedios de altura de planta se observa en la tabla 4.

Tabla 4:*Promedios del desarrollo de altura de plantas de cacao*

Tiempo	Genotipo	Altura (cm)
35 días	IMC - 67	18.2
	POUND - 12	19.1
	SCA - 6	16.6
	EET - 400	19.3
	CCN - 51	18.5
	Cacao común	20.1
65 días	IMC - 67	23.2
	POUND - 12	25.8
	SCA - 6	21.4
	EET - 400	25.0
	CCN - 51	24.3
	Cacao común	25.9
80 días	IMC - 67	27.5
	POUND - 12	29.9
	SCA - 6	26.5
	EET - 400	30.6
	CCN - 51	29.3
	Cacao común	31.0
95 días	IMC - 67	30.5
	POUND - 12	32.8
	SCA - 6	31.2
	EET - 400	32.3
	CCN - 51	32.1
	Cacao común	33.1
110 días	IMC - 67	31.3
	POUND - 12	34.3
	SCA - 6	33.8
	EET - 400	33.8
	CCN - 51	33.1
	Cacao común	34.8

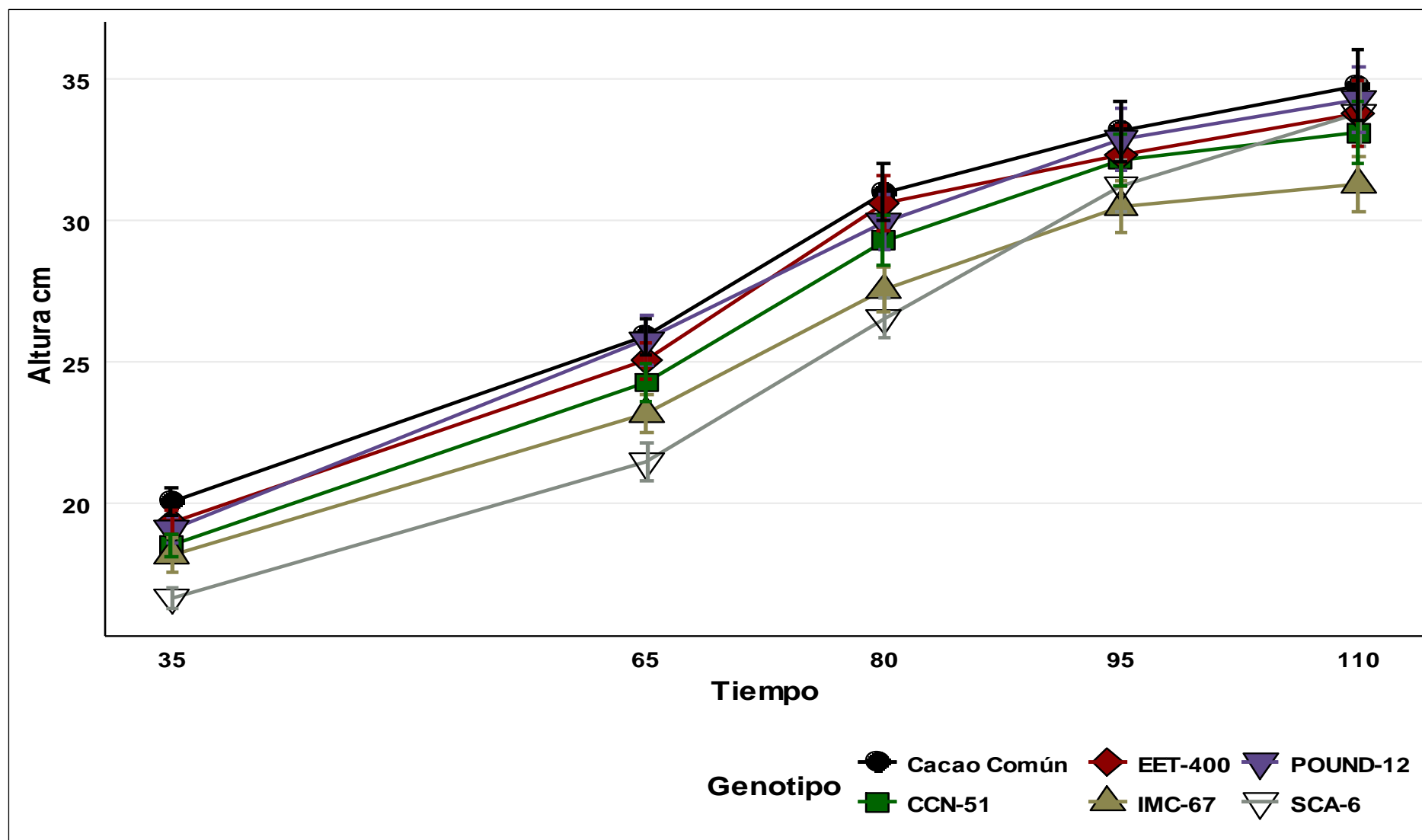


Figura 12: Altura de plantas de cacao con cinco periodos de evaluación. Colores distintos indica diferentes genotipos.

5.2. Diámetro de tallo

En el anexo 3, se muestra el análisis de varianza de diámetro del tallo de las plantas de cacao evaluados a los 35, 65, 80, 95 y 110 días después de la siembra, se encontraron diferencias significativas en genotipos en los cinco periodos de evaluación ($P \leq 0,05$).

La tabla 5 se muestra el análisis de varianza (P -valor) de diámetro de planta, donde fueron observadas diferencias significativas en los cinco periodos de evaluación.

Tabla 5:
Análisis de varianza (P -valor) de diámetro de tallo

F.V.	G.L.	P-valor de diámetro de tallo				
		35 días	65 días	80 días	95 días	110 días
Cd	1	0,255	0,2085	0,8131	0,7052	0,870197
Pb	1	0,6715	0,8568	0,6032	0,2802	0,226533
Genotipo	5	4,974E-16 *	5,817E-09 *	2,241E-06 *	2,11E-07 *	0,007459 *
Cd x Pb	1	0,922	0,9608	0,8377	0,4118	0,339631
Cd x Genotipo	5	0,9692	0,488	0,5066	0,2336	0,16279
Pb x Genotipo	5	0,7911	0,9455	0,6906	0,6685	0,77221
Cd x Pb x Genotipo	5	0,9162	0,7584	0,8211	0,3741	0,772456
Error	96					
Total	119					

* Significativo al 5 % con el test F.

Así, en la figura 13 se observa el crecimiento del diámetro de tallo de los genotipos de cacao en los cinco periodos de evaluación, en lo que resulto tener el mayor diámetro a los 110 días el genotipo POUND-12 con un valor de 8,1 mm., seguido del Cacao común con 8,0 mm., IMC-67 con 7,7 mm., EET-400 con 7,6 mm., CCN-51 con 7,4 mm. y SCA-6 con 7,2 mm.. Estos promedios de diámetro de tallo de los diferentes genotipos de cacao se observa en la tabla 6.

Tabla 6:
Promedios del desarrollo de diámetro de plantas de cacao

Tiempo	Genotipo	Diámetro (mm)
35 días	IMC - 67	3.7
	POUND - 12	3.8
	SCA - 6	3.1
	EET - 400	3.9
	CCN - 51	3.7
	Cacao común	4.0
65 días	IMC - 67	5.0
	POUND - 12	5.1
	SCA - 6	4.2
	EET - 400	5.1
	CCN - 51	5.0
	Cacao común	5.6
80 días	IMC - 67	6.0
	POUND - 12	6.2
	SCA - 6	5.3
	EET - 400	6.1
	CCN - 51	6.1
	Cacao común	6.3
95 días	IMC - 67	7.0
	POUND - 12	7.1
	SCA - 6	6.2
	EET - 400	7.1
	CCN - 51	7.1
	Cacao común	7.7
110 días	IMC - 67	7.7
	POUND - 12	8.1
	SCA - 6	7.2
	EET - 400	7.7
	CCN - 51	7.4
	Cacao común	8.0

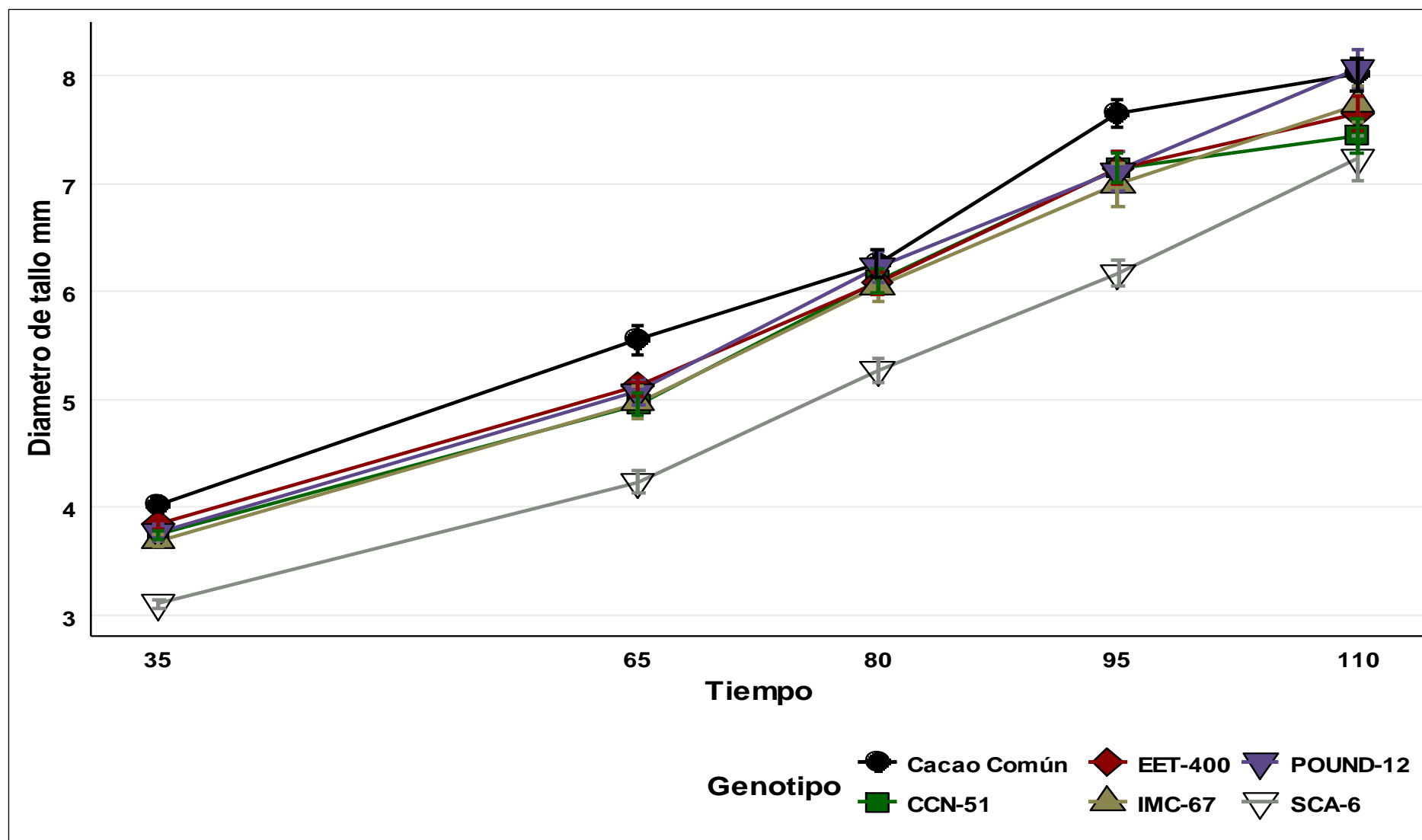


Figura 13: Diámetro de tallo de plantas de cacao con cinco periodos de evaluación. Colores distintos indica diferentes genotipos.

5.3. Número de hojas

En el anexo 4, se muestra el análisis de varianza del número de hojas de las plantas de cacao evaluados a los 35, 65, 80, 95 y 110 días después de la siembra, se encontraron diferencias significativas a los 35 días, 65 días, 95 días y 110 días ($P \leq 0,05$).

En la tabla 7 se muestra el análisis de varianza (P -valor) del número de hojas, indica que, existen diferencias significativas entre los genotipos evaluados en cuatro periodos (35 días, 65 días, 95 días y 110 días).

Tabla 7:
Análisis de varianza (P -valor) de número de hojas

F.V.	G.L.	P-valor de número de hojas				
		35 días	65 días	80 días	95 días	110 días
Cd	1	0,54069	0,19960	0,28670	0,18554	0,28402
Pb	1	0,54069	0,11772	0,75080	0,95757	0,30445
Genotipo	5	0,01515 *	0,05507 *	0,10410	0,00596 *	0,05285 *
Cd x Pb	1	0,15522	0,73846	0,83980	0,48974	0,92865
Cd x Genotipo	5	0,21094	0,99710	0,79640	0,83665	0,83154
Pb x Genotipo	5	0,28912	0,52912	0,60010	0,82456	0,27118
Cd x Pb x Genotipo	5	0,64701	0,35938	0,66000	0,71275	0,58602
Error	96					
Total	119					

* Significativo al 5 % con el test F.

En la figura 14 se presenta el número de hojas de genotipos de cacao en cinco periodos de evaluación, que resulto tener mayor cantidad de hojas el CCN-51 con 20 hojas a los 110 días, seguido del Cacao común con 19 hojas, EET-400 con 19 hojas, POUND-12 con 18 hojas, IMC-67 con 17 hojas y SCA-6 con 17 hojas. Estos promedios de número de hojas de plantas de cacao se observa en la tabla 8.

Tabla 8:
Promedios del número de hojas de plantas de cacao

Tiempo	Genotipo	N° de Hojas
35 días	IMC - 67	5
	POUND - 12	6
	SCA - 6	5
	EET - 400	5
	CCN - 51	5
	Cacao común	5
65 días	IMC - 67	10
	POUND - 12	11
	SCA - 6	10
	EET - 400	11
	CCN - 51	12
	Cacao común	11
80 días	IMC - 67	14
	POUND - 12	14
	SCA - 6	13
	EET - 400	15
	CCN - 51	16
	Cacao común	15
95 días	IMC - 67	16
	POUND - 12	16
	SCA - 6	16
	EET - 400	17
	CCN - 51	19
	Cacao común	17
110 días	IMC - 67	17
	POUND - 12	18
	SCA - 6	17
	EET - 400	19
	CCN - 51	20
	Cacao común	19

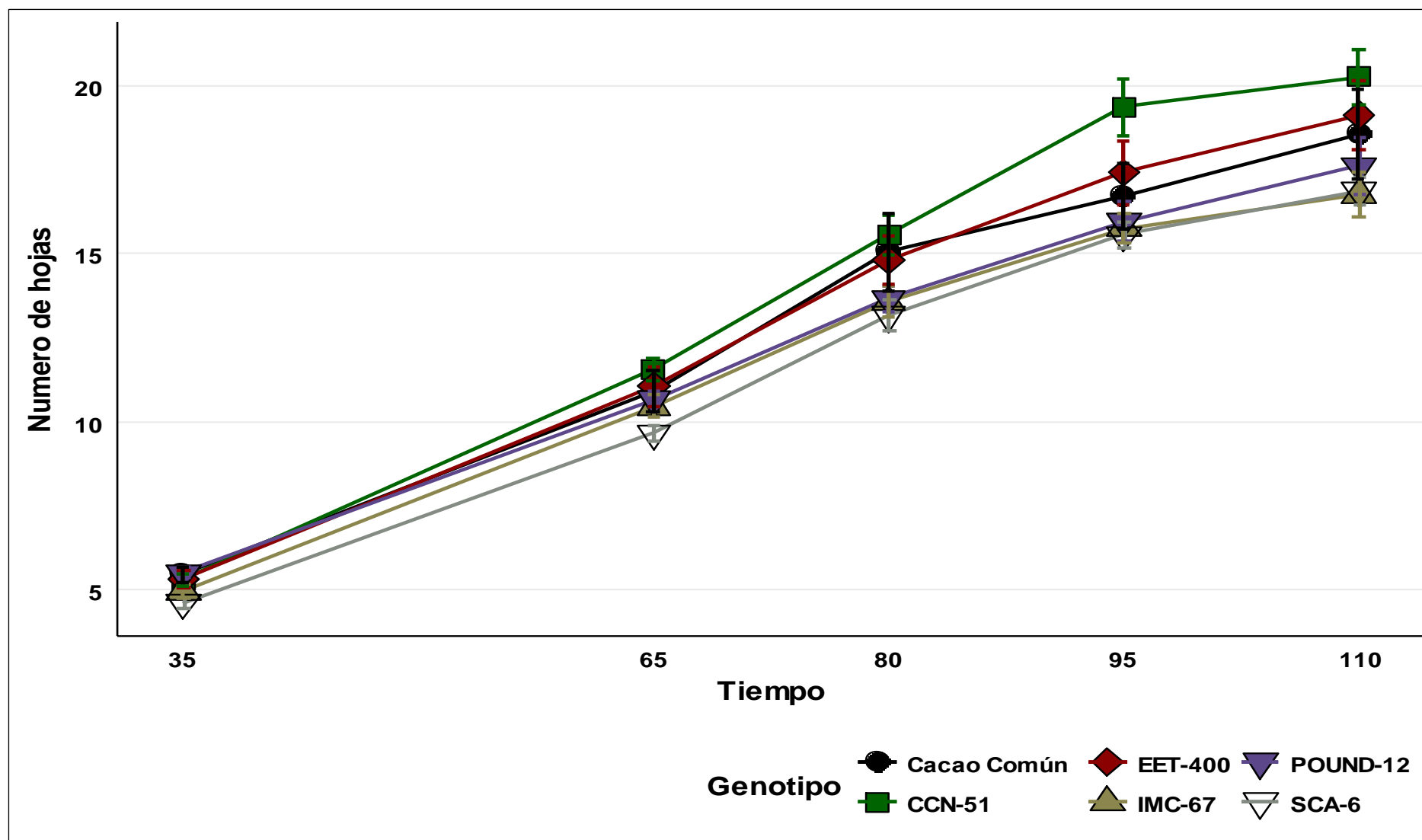


Figura 14: Número de hojas de plantas de cacao con cinco periodos de evaluación. Colores distintos indica diferentes genotipos.

En el desarrollo de plántulas de cacao, en sus valores de altura, diámetro y número de hojas, el que ha tenido mayor desarrollo, es el Cacao común, seguido de CCN-51, EET-400, POUND-12, SCA-6 y IMC-67, lo cual concuerda con lo reportado por Garzón y Paulin (2006), quienes indican que por propagación por semilla el SCA-6 (118 cm) obtuvo mayor altura que el IMC-67 (108 cm), pero en diámetro de tallo fue menor el SCA-6. Vera (1974), reporta que encontró diferencias significativas entre genotipos de cacao en valores de altura, diámetro y hojas.

5.4. Área foliar y radicular

En la tabla 9, se muestra el análisis de varianza (*P*-valor) del área foliar y radicular, y existe diferencia significativa entre genotipos para el área foliar y el área radicular. Pero para Cadmio, Plomo, Genotipo x Cd, Genotipo x Pb, Cd x Pb y Genotipo x Cd x Pb no presentó diferencia significativa ($P < 0,05$).

Tabla 9:
Análisis de varianza (P-valor) del área foliar y radicular

F.V.	G.L.	P-valor de área	
		Foliar	Radicular
Genotipo	5	0,03662 *	1,442E-09 *
Cd	1	0,51396	0,9294
Pb	1	0,24366	0,1106
Genotipo x Cd	5	0,39555	0,3329
Genotipo x Pb	5	0,8534	0,5379
Cd x Pb	1	0,67355	0,8696
Genotipo x Cd x Pb	5	0,88184	0,5575
Error	96		
Total	119		

* Significativo al 5 % con el test F.

En la figura 15, se presenta la comparación de medias del área foliar. Al comparar el área foliar de genotipos se destaca que el POUND-12, ha tenido el mayor valor con 535,2 cm², seguido de EET-400 (515,6 cm²), SCA-6 (507,0 cm²) y Cacao común (495,8 cm²), en comparación con IMC-67 (473,9 cm²) y CCN-51 (445,3 cm²) con menor área foliar. Estos promedios de área foliar se presenta en la tabla 10.

Tabla 10:

Promedio del área foliar y radicular de genotipos de cacao

Genotipo	Área foliar (cm ²)	Área radicular (cm ²)
Cacao común	495,8 a	107,0 a
CCN-51	445,3 b	91,6 a
EET-400	515,6 a	74,2 b
IMC-67	473,9 b	104,6 a
POUND-12	535,2 a	101,4 a
SCA-6	507,0 a	63,3 b

Promedios con igual letra en columna no son significativo según la prueba de Scott-Knott ($P < 0,05$).

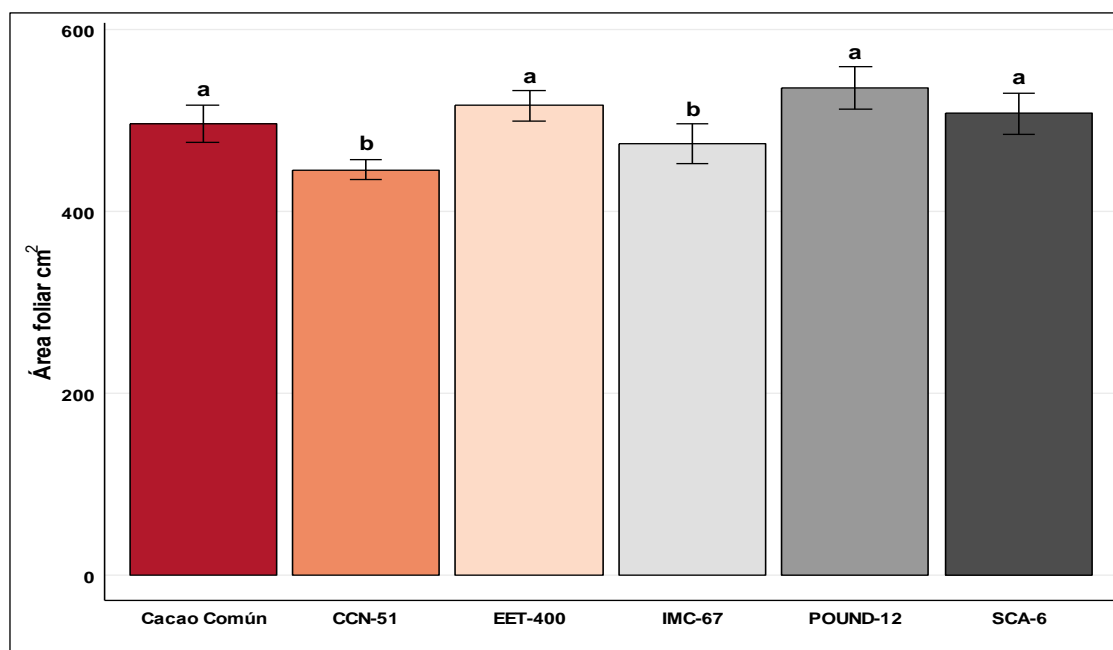


Figura 15: Comparación de medias del área foliar.

Así, también en la figura 16, se compara el área radicular de genotipos, y el que mayor valor a tenido fue el Cacao común con 107,0 cm², seguido del IMC-67 (104,6 cm²), POUN-12 (101,4 cm²), CCN-51 (91,6 cm²), en comparación con EET-400 (74,2 cm²) y SCA-6 (63,3 cm²) con menor área radicular. Estos promedios de área radicular se presentan en la tabla 10.

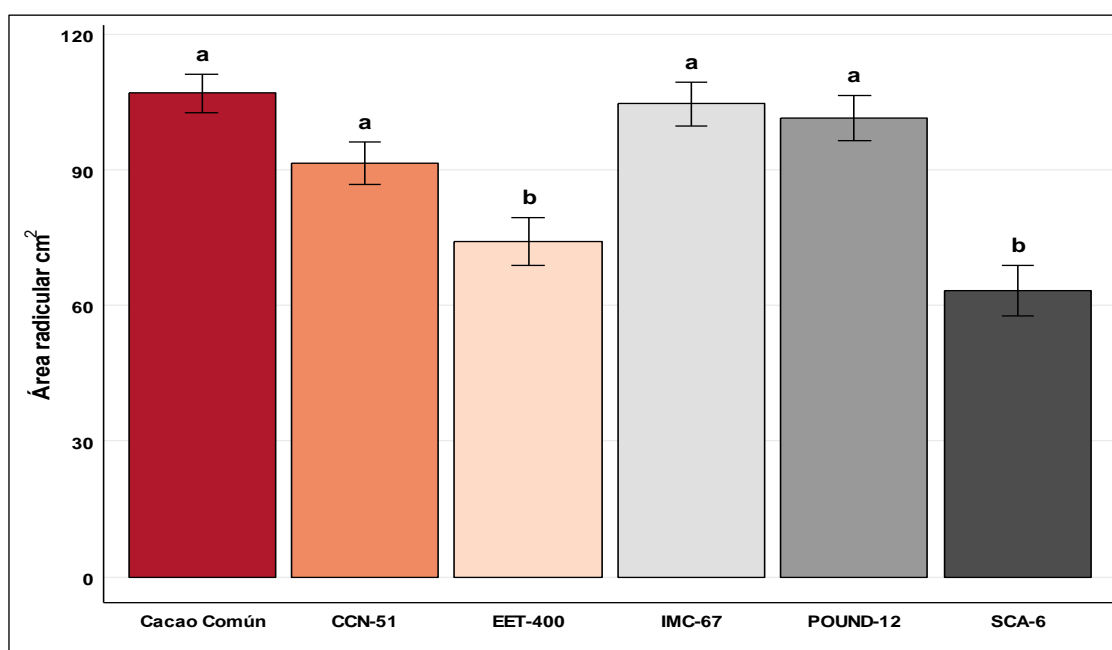


Figura 16: Comparación de medias del área radicular.

5.5. Materia seca

En la tabla 11, se muestra el análisis de varianza (*P*-valor) de materia seca foliar y materia seca radicular, y existe diferencia significativa entre genotipos. Pero para Cadmio, Plomo, Genotipo x Cd, Genotipo x Pb, Cd x Pb y Genotipo x Cd x Pb no presentó diferencia significativa (*P* < 0,05).

Tabla 11:*Análisis de varianza (P-valor) de materia seca foliar y raíz*

F.V.	G.L.	P-valor de materia seca	
		Foliar	Raíz
Genotipo	1	5,89E-08 *	3,55E-07 *
Cd	1	0,1559	0,9563
Pb	5	0,9863	0,4484
Genotipo x Cd	1	0,1	0,6377
Genotipo x Pb	5	0,8381	0,6201
Cd x Pb	5	0,3315	0,5023
Genotipo x Cd x Pb	5	0,6721	0,7592
Error	96		
Total	119		

* Significativo al 5 % con el test F.

Tabla 12:*Promedio de materia seca foliar y radicular*

Genotipo	Materia seca		Materia seca	
	foliar (g)		raíz (g)	
Cacao común	7,3	a	2,4	a
CCN-51	6,3	b	1,9	b
EET-400	6,8	b	2,0	b
IMC-67	6,5	b	2,1	b
POUND-12	6,6	b	2,1	b
SCA-6	5,6	c	1,4	c

Promedios con igual letra en columna no son significativo según la prueba de Scott-Knott ($P < 0,05$).

En la materia seca foliar el Cacao común ha tenido mayor peso seco (7,3 g), en comparación con los genotipos EET-400, POUND-12, IMC-67 y CCN-51 con valores de 6,8; 6,6; 6,5 y 6,3 gramos, respectivamente. Mientras que SCA-6 ha mostrado menor peso seco con 5,6 g., como se muestra en la tabla 12, y la comparación de medias en la figura 17.

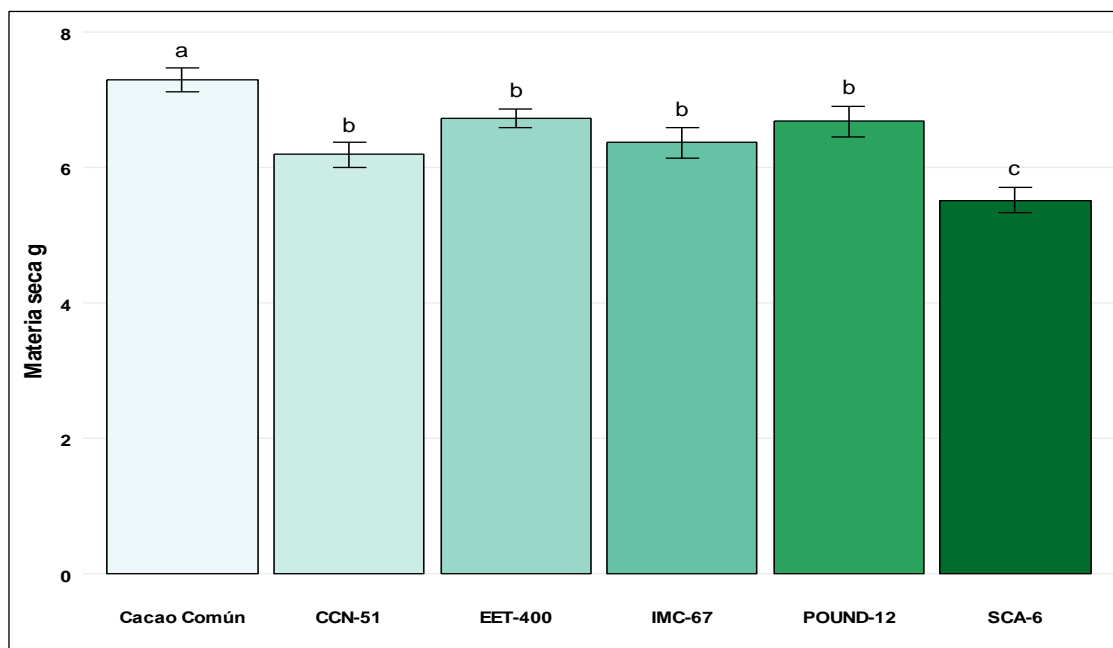


Figura 17: Comparación de medias de materia seca de la parte foliar.

En la figura 18, se presenta la comparación de media de materia seca de la raíz, donde el Cacao común (2,4 g), presentó los mayores valores en comparación con POUND-12, IMC-67, EET-400 y CCN-51 con valores de 2,09; 2,08; 2,0 y 1,9 gramos, respectivamente. Así, el SCA-6 tuvo menor peso seco (1,4 g) y en la tabla 12 se presenta los promedios.

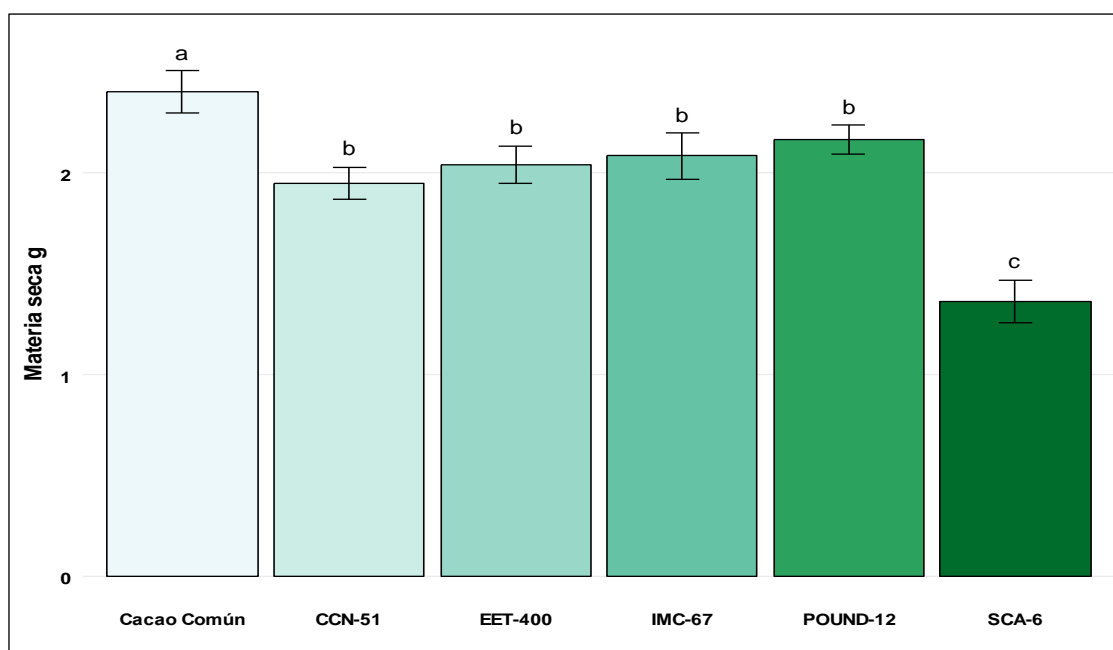


Figura 18: Comparación de media de materia seca de la raíz.

Los resultados de área y materia seca, presentados en el presente experimento, coinciden con Vera (1974), que encontró diferencias significativas en materia seca de la parte aérea y raíz de genotipos de cacao propagados por semillas.

Los resultados de área y materia seca, se compara con el desarrollo de plántulas, en lo que se observa los valores de altura, diámetro y número de hojas de los genotipos, los que mayor han desarrollado tienen mayor materia seca. Esto se comparan con García (2004), que el crecimiento y distribución de masa seca de tres clones de cacao, tuvo diferencias significativas entre clones en valores de diámetro, número de hojas y masa seca.

5.6. Análisis de Cadmio y Plomo

En la tabla 13, se muestra el análisis de varianza (*P*-valor) de cadmio de la parte foliar y raíz de los genotipos de cacao, y se encontraron diferencias significativas en genotipos, cadmio y plomo en la parte foliar y raíz, como se muestra en el análisis de varianza de cadmio en el anexo 7 ($P \leq 0,05$).

Tabla 13:

Análisis de varianza (P-valor) de análisis de cadmio

F.V.	G.L.	P-valor de análisis de Cadmio	
		Foliar	Radicular
Genotipo	5	1,94E-09 *	8,90E-13 *
Cadmio	1	< 2E-16 *	< 2E-16 *
Plomo	1	8,09E-06 *	0,16818
Genotipo x Cd	5	0,000123 *	5,98E-08 *
Genotipo x Pb	5	1,69E-13 *	0,00346 *
Cd x Pb	1	0,006088 *	0,19130
Genotipo x Cd x Pb	5	1,69E-15 *	0,02817 *
Error	96		
Total	119		

* Significativo al 5 % con el test F.

Se presenta la prueba de Scott-Knott y promedios del análisis de cadmio de la parte foliar y radicular en la tabla 14.

Tabla 14:

Promedio del análisis de cadmio en la parte foliar y raíz

Genotipo	Cadmio	Plomo	Foliar	Raíz
Cacao común	No	No	4,4 b	1,5 b
	Si	No	5,4 b	3,6 a
	No	Si	3,7 c	2,2 b
	Si	Si	20,9 a	2,0 b
CCN-51	No	No	2,3 c	1,1 b
	Si	No	16,2 a	2,6 a
	No	Si	6,7 b	1,2 b
	Si	Si	10,4 a	4,0 a
EET-400	No	No	6,0 b	3,1 a
	Si	No	10,9 a	6,8 a
	No	Si	13,3 a	2,2 b
	Si	Si	15,4 a	6,3 a
IMC-67	No	No	3,4 c	1,4 b
	Si	No	8,0 b	2,1 b
	No	Si	0,6 d	1,1 b
	Si	Si	19,2 a	2,1 b
POUND-12	No	No	2,7 c	1,5 b
	Si	No	8,0 b	3,9 a
	No	Si	2,6 c	3,3 a
	Si	Si	12,6 a	2,9 a
SCA-6	No	No	3,5 c	0,4 c
	Si	No	14,3 a	5,0 a
	No	Si	0,6 d	2,4 b
	Si	Si	4,8 b	6,8 a

Promedios con igual letra en columna no son significativo según la prueba de Scott-Knott ($P < 0,05$).

Así, en la figura 19, se muestra la comparación de medias del análisis foliar, entre la interacción genotipo, cadmio y plomo. El SCA-6 con aplicación de cadmio y plomo, ha presentado el menor contenido de cadmio en la parte foliar, con un valor de 4,8 $\mu\text{g planta}^{-1}$, seguido de Cacao común, POUND-12 y IMC-67 con aplicación de cadmio, con valores de 5,4; 8,0 y 8,0 $\mu\text{g planta}^{-1}$, respectivamente.

Los genotipos CCN-51, POUND-12, EET-400, IMC-67 y Cacao común, con aplicación de cadmio y plomo, han obtenido valores de 10,4; 12,6; 15,4; 19,2 y 20,9 $\mu\text{g planta}^{-1}$, respectivamente. Mientras que, EET-400, SCA-6 y CCN-51 con aplicación de cadmio, han presentado valores de 10,9; 14,3 y 16,2 $\mu\text{g planta}^{-1}$, respectivamente.

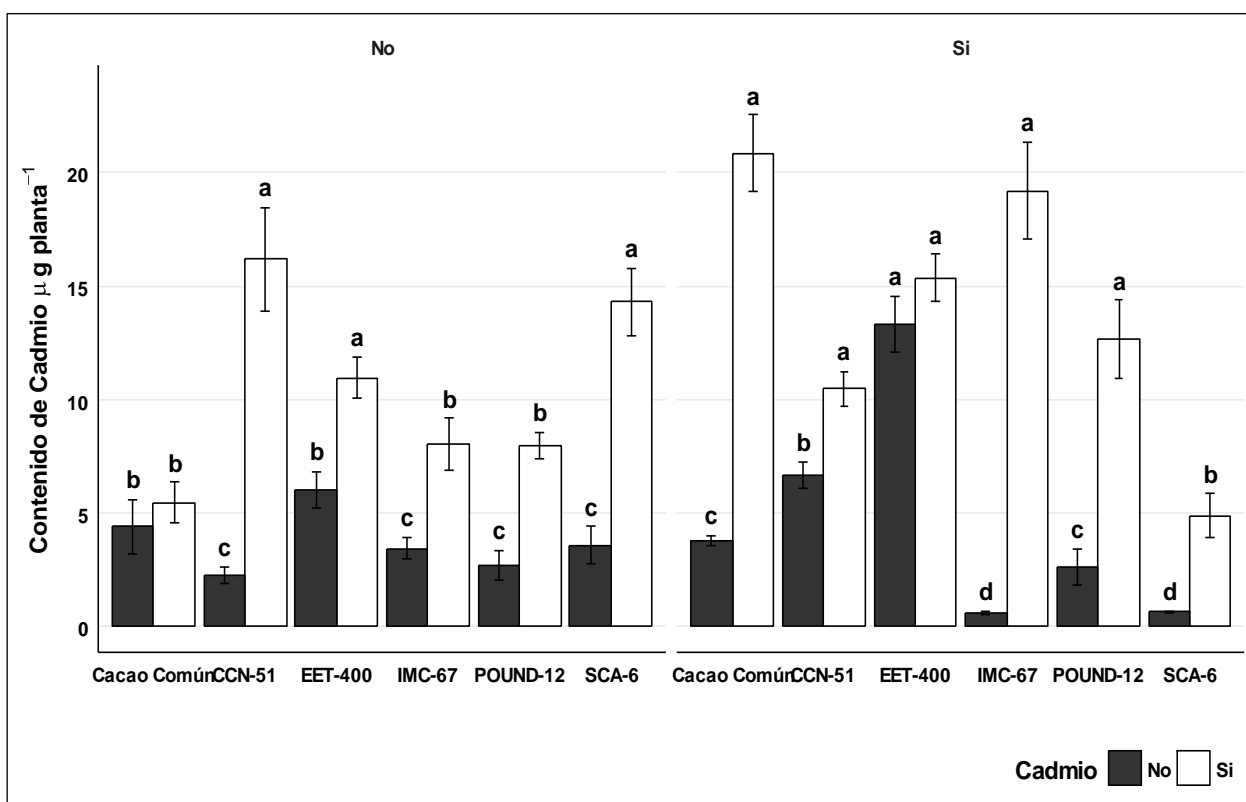


Figura 19: Comparación de medias del análisis de cadmio de la parte foliar.

Los promedios del análisis de cadmio de la raíz se muestran en la tabla 14 y la comparación de medias en la figura 20. El Cacao común con aplicación de cadmio y plomo, obtuvo el menor valor con $2,0 \mu\text{g planta}^{-1}$, seguido de IMC-67 con aplicación de cadmio, con $2,1 \mu\text{g planta}^{-1}$.

Los genotipos IMC-67, POUND-12, CCN-51, EET-400 y SCA-6 con aplicación de cadmio y plomo, obtuvieron valores promedios de 2,1; 2,9; 4,0; 6,3 y 6,8 $\mu\text{g planta}^{-1}$, respectivamente. Mientras que, CCN-51, Cacao común, POUND-12, SCA-6 y EET-400 con aplicación de cadmio han presentado valores promedios de 2,6; 3,6; 3,9; 5,0 y 6,8 $\mu\text{g planta}^{-1}$, respectivamente.

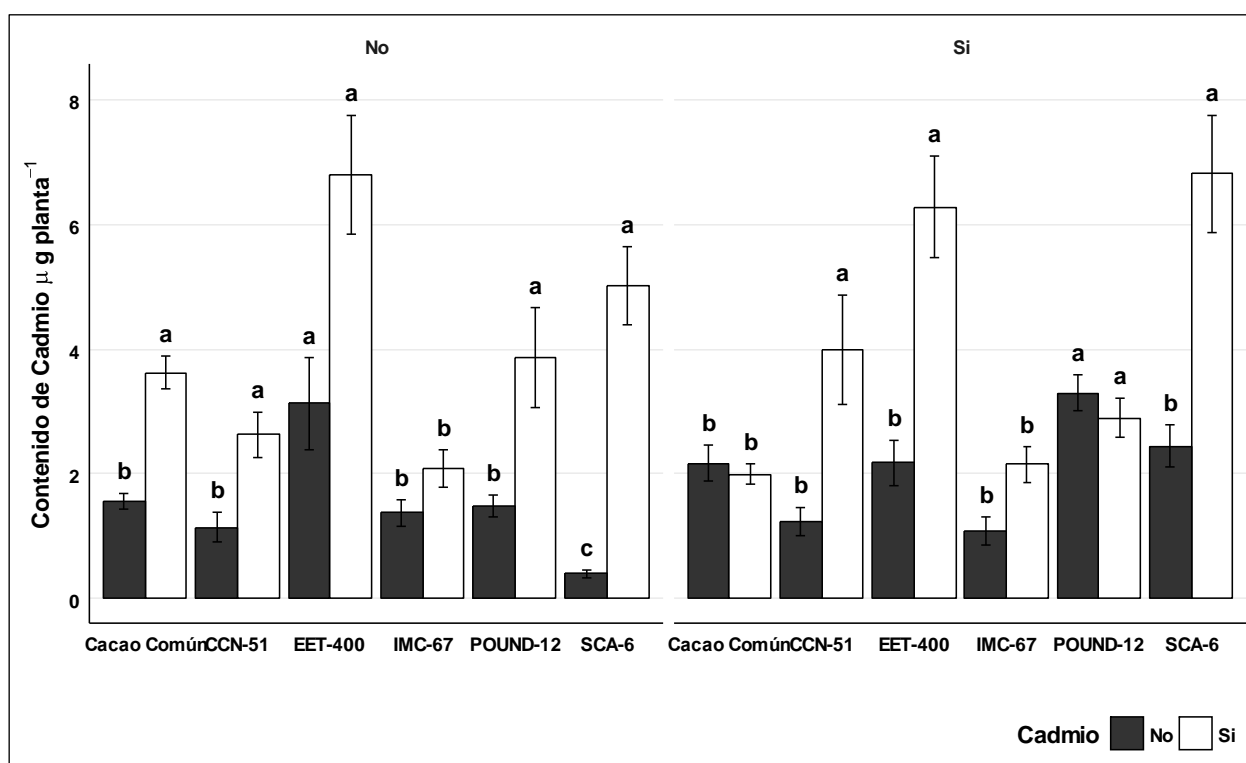


Figura 20: Comparación de medias del análisis de cadmio en la raíz.

En la tabla 15, se muestra el análisis de varianza (*P*-valor) de Plomo de la parte foliar y raíz de plantas de cacao. Para, la parte foliar se mostraron diferencia significativa en genotipos, cadmio y plomo. Mientras que, para la parte de la raíz se presentó diferencia significativa en, genotipos-cadmio, genotipo-plomo y cadmio-plomo, como también se muestra en el anexo 8 (*P* ≤0,05).

Tabla 15:

Análisis de varianza (P-valor) de análisis de plomo

F.V.	G.L.	P-valor de análisis de Plomo	
		Foliar	Radicular
Genotipo	5	0,009678 *	2,47E-11 *
Cadmio	1	0,761408	0,304377
Plomo	1	5,20E-07 *	7,95E-15 *
Genotipo x Cd	5	6,84E-05 *	1,67E-07 *
Genotipo x Pb	5	0,000302 *	1,44E-05 *
Cd x Pb	1	0,869229	0,000259 *
Genotipo x Cd x Pb	5	0,000162 *	0,157189
Error	96		
Total	119		

* Significativo al 5 % con el test F.

En la figura 21, se muestra la comparación de medias entre la interacción genotipo, cadmio y plomo, del contenido de plomo en la parte foliar y en la tabla 16 los valores de la media. El POUND-12 con aplicación de plomo, presenta menor contenido de plomo en la parte foliar, con un valor de 2,3 µg planta⁻¹, seguido del CCN-51 con aplicación de cadmio y plomo, con un valor de 2,7 µg planta⁻¹. Así, el Cacao común, CCN-51, IMC-67, SCA-6 y EET-400 con aplicación de plomo, obtuvieron valores promedios de 18,4; 27,4; 47,2; 52,4 y 165,8 µg planta⁻¹, respectivamente. En comparación con, SCA-6, EET-400, POUND-12, IMC-67 y Cacao común, con aplicación de

cadmio y plomo, presenta valores promedios de 26,8; 41,7; 48,6; 57,3 y 142,3 $\mu\text{g planta}^{-1}$, respectivamente.

Tabla 16:

Promedio del análisis de plomo en la parte foliar

Genotipo	Cadmio	Plomo	Foliar	
Cacao común	No	No	10,7	c
	Si	No	6,3	c
	No	Si	18,4	c
	Si	Si	142,3	a
CCN-51	No	No	12,7	c
	Si	No	29,6	b
	No	Si	27,4	b
	Si	Si	2,7	c
EET-400	No	No	14,0	c
	Si	No	2,0	c
	No	Si	165,8	a
	Si	Si	41,7	b
IMC-67	No	No	4,9	c
	Si	No	17,2	c
	No	Si	47,2	b
	Si	Si	57,3	b
POUND-12	No	No	2,4	c
	Si	No	6,4	c
	No	Si	2,3	c
	Si	Si	48,6	b
SCA-6	No	No	32,9	b
	Si	No	36,0	b
	No	Si	52,4	b
	Si	Si	26,8	c

Promedios con igual letra en columna no son significativo según la prueba de Scott-Knott ($P < 0,05$).

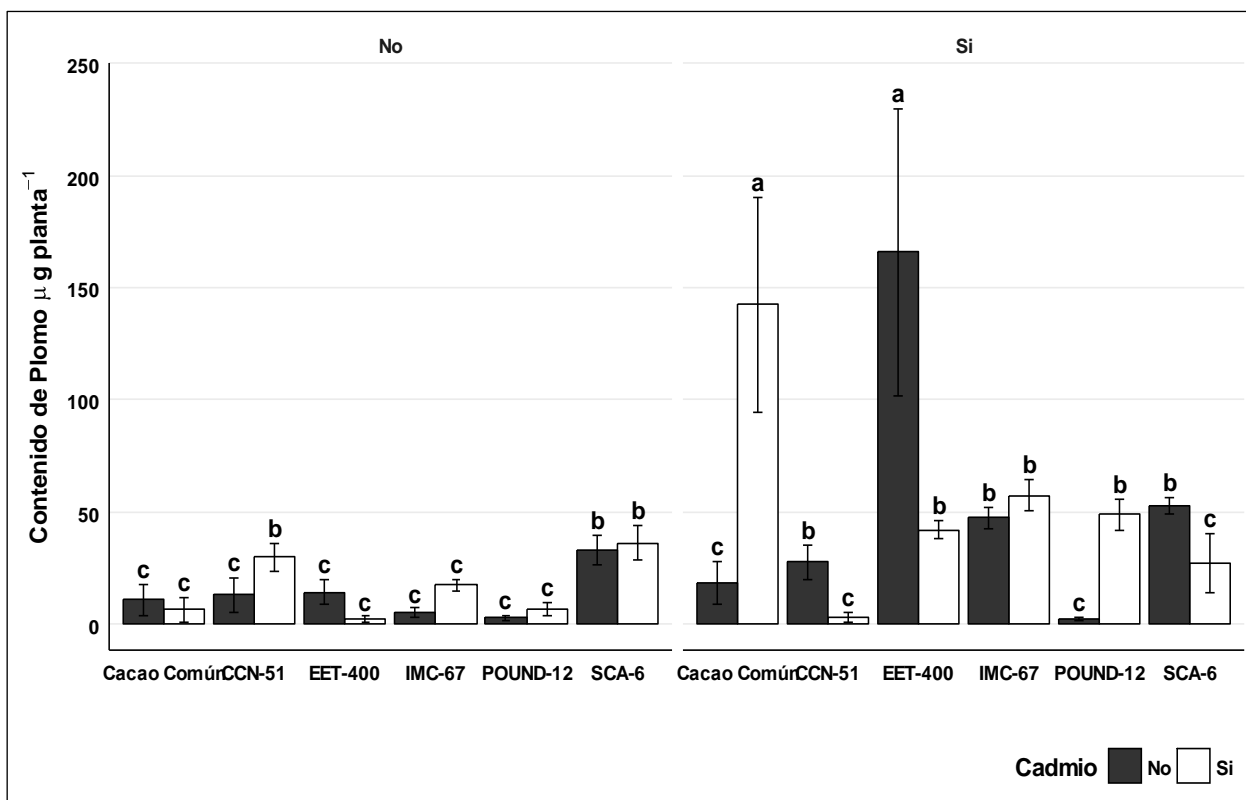


Figura 21: Comparación de medias del análisis de plomo de la parte foliar.

La comparación de medias del contenido de plomo en la parte de la raíz, de la interacción genotipo-cadmio, se presenta en la figura 22 y los valores de la media en la tabla 17. Los genotipos IMC-67 y Cacao común, mostraron menor promedio con valores de 5,5 y 6,6 $\mu\text{g planta}^{-1}$ con aplicación de cadmio, seguido de CCN-51, POUND-12, SCA-6 y EET-400 con valores promedios de 14,7; 20,6; 22,2 y 28,7 $\mu\text{g planta}^{-1}$, respectivamente.

Tabla 17:

Promedio del análisis de plomo de la comparación genotipo – cadmio en la raíz.

Genotipo	Cadmio	Raíz
Cacao común	No	20,2 a
	Si	6,6 c
CCN-51	No	14,0 b
	Si	14,7 b
EET-400	No	13,6 b
	Si	28,7 a
IMC-67	No	8,1 c
	Si	5,5 c
POUND-12	No	25,6 a
	Si	20,6 a
SCA-6	No	21,1 a
	Si	22,2 a

Promedios con igual letra en columna no son significativo según la prueba de Scott-Knott ($P < 0,05$).

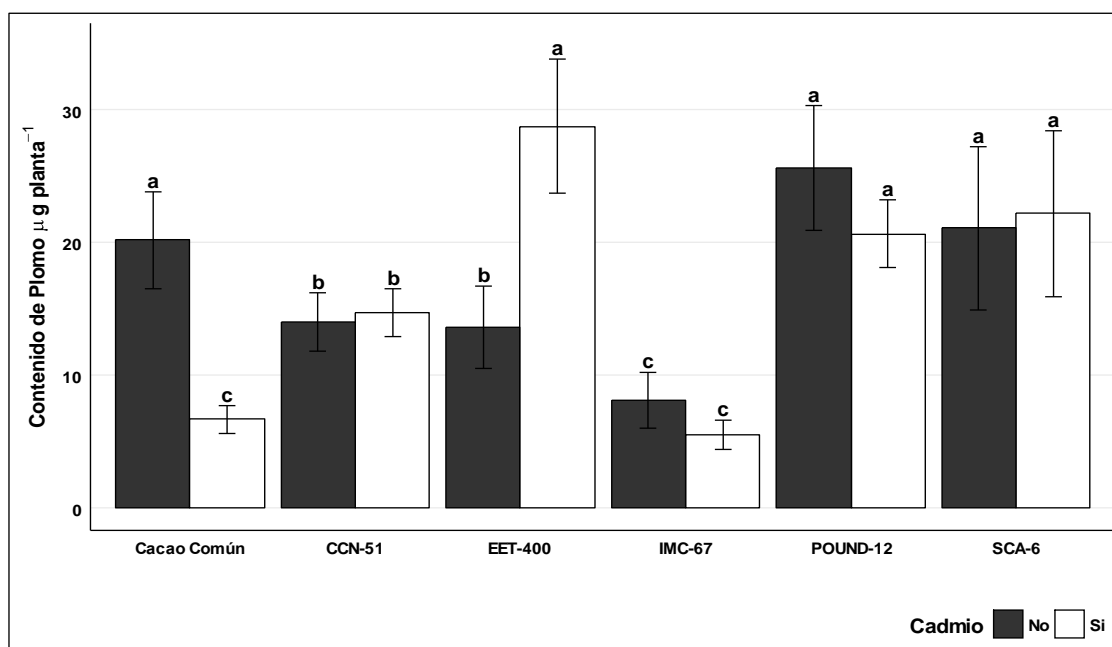


Figura 22: Comparación de medias, Genotipo – Cadmio del contenido de plomo en la raíz.

La interacción genotipo-plomo, se muestra en la figura 23. El IMC-67 con aplicación de plomo, presenta el menor valor de 9,5 $\mu\text{g planta}^{-1}$, seguido de Cacao común, CCN-51, POUND-12, EET-400 y SCA-6, con valores promedios de 16,5; 18,4; 31,4; 31,7 y 36,2 $\mu\text{g planta}^{-1}$, respectivamente. Valores presentes en la tabla 18.

Tabla 18:

Promedio del análisis de plomo de la comparación genotipo – plomo en la raíz

Genotipo	Plomo	Raíz	
Cacao común	No	10,3	c
	Si	16,5	b
CCN-51	No	10,3	c
	Si	18,4	b
EET-400	No	10,6	c
	Si	31,7	a
IMC-67	No	4,1	d
	Si	9,5	c
POUND-12	No	14,8	b
	Si	31,4	a
SCA-6	No	7,0	c
	Si	36,2	a

Promedios con igual letra en columna no son significativo según la prueba de Scott-Knott ($P < 0,05$).

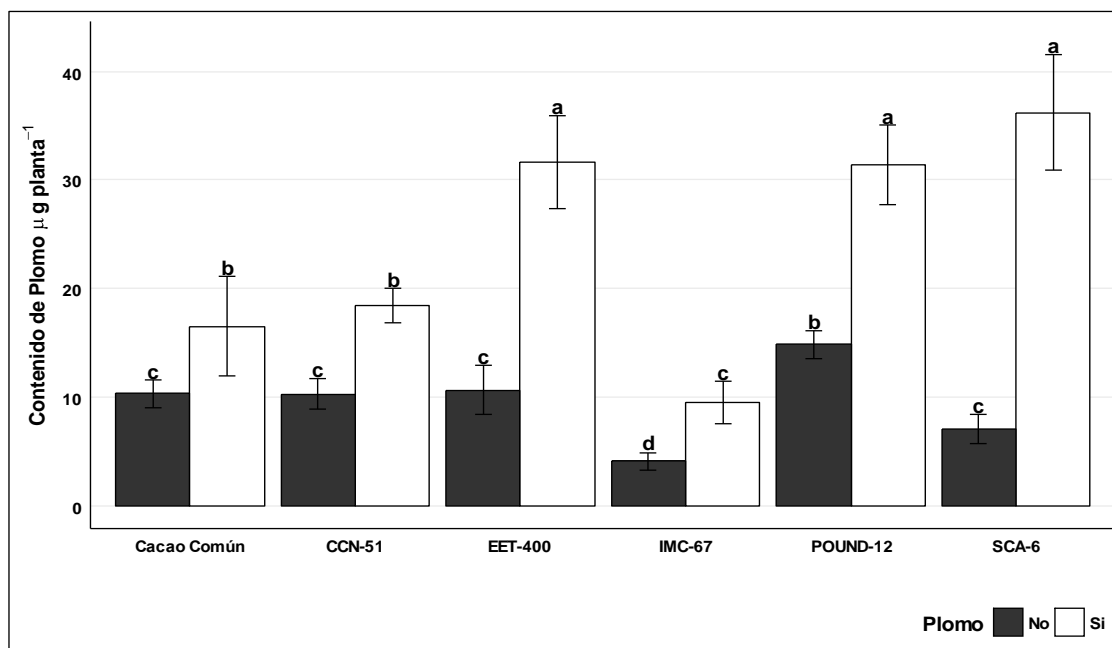


Figura 23: Comparación de medias, Genotipo – Plomo del contenido de plomo en la raíz.

En la figura 24, se muestra la comparación cadmio-plomo del contenido de plomo en la raíz, y en la tabla 19 los valores de la media. Esto quiere decir que el contenido de plomo es mayor cuando tiene aplicación de plomo (25,8 $\mu\text{g planta}^{-1}$) en comparación, con aplicación de cadmio y plomo (22,1 $\mu\text{g planta}^{-1}$).

Tabla 19:

Promedio del análisis de plomo en la comparación cadmio – plomo en la raíz.

Cadmio	Plomo	Raíz	
No	No	8,3	b
Si	No	10,7	b
No	Si	25,8	a
Si	Si	22.1	a

Promedios con igual letra en columna no son significativo según la prueba de Scott-Knott ($P < 0,05$).

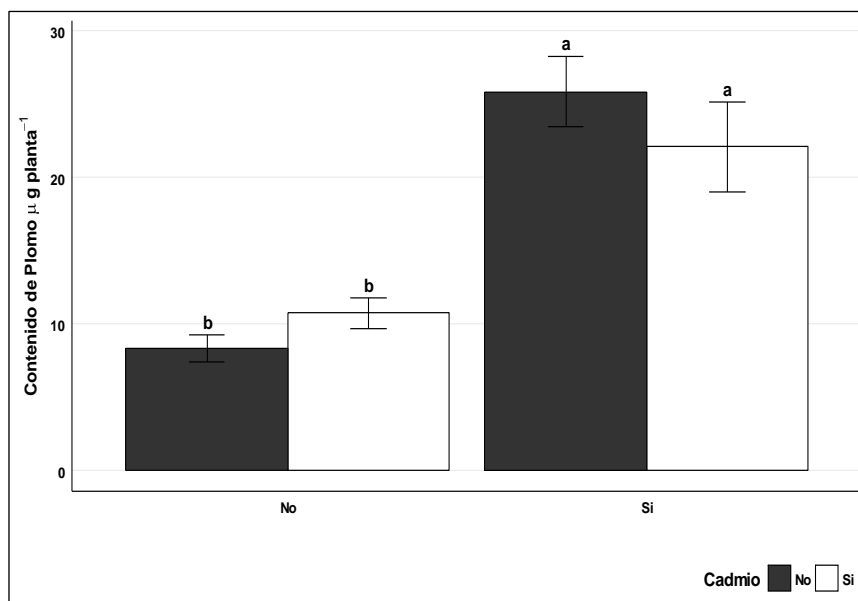


Figura 24: Comparación de medias, Cadmio – Plomo del contenido de plomo en la raíz.

Los genotipos de cacao presentes en este experimento, ha dado resultado a, diferentes contenidos de cadmio (0,6 a 20,9 $\mu\text{g planta}^{-1}$) y plomo (2,0 a 165,8 $\mu\text{g planta}^{-1}$), esto puede responder a los mecanismos de absorción que puede variar de acuerdo a la concentración del metal, especies implicadas, tiempo de exposición (Sanità di Toppi y Gabrielli, 1999). Es posible que las plantas estén adaptando estrategias de desarrollo con la finalidad de disminuir su acumulación de metales pesados.

El contenido de cadmio y plomo en la raíz de los genotipos de cacao fue menor que en la parte foliar, encontrando diferencia significativa entre la parte raíz y parte aérea (anexo 9). Esto probablemente, quiera decir que la movilidad del cadmio y plomo en *Theobroma cacao* L., sea parte foliar > raíz, que ha logrado tener más contenido en la parte foliar que en las raíces. Mientras que, Ramos *et al.*, (2002), dice que el contenido de metal es generalmente mayor en las raíces, que en los tejidos por encima del suelo.

Así también Blum (1997), dice que el contenido de Cd en plantas disminuye en el orden: Raíces> tallos> Hojas> frutas> Semillas. Esto se compara con Chávez *et al.* (2015) y Gramlich *et al.* (2016), que encontraron contenido de cadmio en cacao, que disminuyó en el orden de grano>cáscara>hojas. Sanitá di Toppi y Gabrielli (1999) dice que el cadmio entra por primera vez por las raíces, y por lo tanto son propensos a experimentar daños y acumulación de cadmio en la parte aérea de la planta. El cadmio penetra fácilmente la raíz a través del tejido cortical y se transloca a los tejidos por encima del suelo (Yang *et al.*, 1998).

En el tejido foliar (parte aérea) se encontraron valores promedios del contenido de cadmio de 0,6 a 20,9 $\mu\text{g planta}^{-1}$, y para el contenido de plomo se encontró de 2,0 a 165,8 $\mu\text{g planta}^{-1}$. Kabata-Pendias (2000) consideran que en hojas maduras las concentraciones máximas tolerables de metales pesados es 0.5 mg kg^{-1} , para cadmio y de 10 mg kg^{-1} , para plomo. Valores inferiores encontrados en este trabajo de tesis. Así también, se compara el análisis de metales pesados en cacao en producción que se realizó en 17 parcelas de cacao orgánico en la región Huánuco y 5 parcelas en Ucayali, hallando valores promedios de 0,21 mg kg^{-1} de cadmio y 0,58 mg kg^{-1} de plomo (Huamaní, 2012). La variabilidad del grado en que las plantas son capaces de absorber cadmio depende de su concentración en el suelo y su biodisponibilidad, modulada por la presencia de materia orgánica, pH, potencial redox, temperatura y concentraciones de otros elementos (Hirsch, 1998). Así, la absorción de iones de cadmio parece estar en competencia por

el mismo mecanismo de transporte de nutrientes, tales como K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, Ni (Rivetta, *et al*, 1997).

Los genotipos estudiados en este presente experimento, demuestran que el contenido de cadmio y plomo absorbido, varía según genotipos, esto concuerda con Saverbeck & Hein (1991); Davies (1992) y Smith, (1994) que la disponibilidad de los metales pesados también depende del uso de especies vegetales.

VI. CONCLUSIONES

- 6.1.** La acumulación de cadmio y plomo en las partes vegetativas de los genotipos de cacao no presentaron alteraciones en el desarrollo de altura de planta (cm), diámetro de tallo (mm) y número de hojas, en plantones de cacao en etapa de vivero.
- 6.2.** La presencia de los metales pesados en los tejidos vegetales, no ha presentado diferencia significativa en área y materia seca con relación al testigo.
- 6.3.** El promedio de la acumulación de cadmio ($8,2 \mu\text{g planta}^{-1}$) y plomo ($33,7 \mu\text{g planta}^{-1}$) en la parte foliar de los seis genotipos de cacao fue mayor que en la raíz, con $2,9 \mu\text{g planta}^{-1}$ (cadmio) y $16,7 \mu\text{g planta}^{-1}$ (plomo).
- 6.4.** Los genotipos que presentaron baja capacidad de absorción de metales pesados fueron el IMC-67 con $8 \mu\text{g planta}^{-1}$, POUND-12 con $8 \mu\text{g planta}^{-1}$ y el cacao común con $5,4 \mu\text{g planta}^{-1}$, de una concentración de 25 mg l^{-1} de Cd para cada planta.

VII. RECOMENDACIONES

- 7.1.** Realizar una investigación sobre la absorción de cadmio y plomo, con los seis genotipos estudiados en este experimento a nivel de campo.
- 7.2.** En otras investigaciones, considerar la nutrición de las plantas de cacao con relación a la absorción de los metales pesados.
- 7.3.** Determinar la acumulación de metales pesados en plantas de cacao, con propagación vegetativa.
- 7.4.** Realizar un muestreo y análisis de suelos de diferentes provincias de la región San Martín, para determinar la contaminación de metales pesados.
- 7.5.** Realizar comparaciones con la aplicación de fertilizantes químicos y orgánicos y la inoculación de metales pesados, para determinar la capacidad de absorción de metales pesados en plantas de cacao.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, A. M. M. (2007). *Determinación de metales pesados en suelos agrícolas del valle del Mezquital, HGO* (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México.
- Alloway, B. J. (2013). *Heavy Metals in Soils*. New York, London: Springer.
- Augstburger, F., Berger, J., Censkowsky, U., Heid, P., Milz, J. y otros (2000). Agricultura orgánica en el trópico y subtrópico. En: Guía de 18 cultivos. 1ra Edición. Alemania. 24p.
- Balderas, P. J. A., Cajuste, L. J., Lugo, F. J. A. y Vázquez A. A. (2003). Suelos agrícolas contaminados por metales pesados provenientes de depósitos de vehículos de desecho. *Terra Latinoamericana*, 21(4), 449-459.
- Barceló J, Poschenrieder C (1990) Relaciones planta agua como afectado por el estrés por metales pesados: una revisión. *J. Plant Nutr.* 13: 1-37.
- Benavides P. María, Gallego M. Susana, Tomaro L. María (2005). *Cadmium toxicity in plants*. Buenos aires, Argentina.
- Blum WH (1997) absorción de cadmio por las plantas superiores. En: Actas de resúmenes extendidos desde la Cuarta Conferencia Internacional sobre la Biogeoquímica de Elementos Traza, pp.109-110, Berkeley, EE.UU. Universidad de California.

- Chavez, E.; He, Z.; Stoffella, P.; Mylavarapu, R.; Li, Y.; Moyano, B. y Baligar, V. (2015). Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador. *Science of the Total Environment*, 533 : 205–214.
- Davies, B.E. (1992). Inter-relationship between soil properties and uptake of Cd, Cu, Pb and Zn from contaminated soils by radish (*Raphanus sativa* L.). *Water Air Soil Pollut.* 63:331-342.
- De Santiago, M. A. (2013). *Papel de los constituyentes edáficos en la disponibilidad de metales pesados en suelos calcáreos de uso agrícola del área mediterránea. Enfoque químico y biológico* (Tesis doctoral). Universidad Complutense de Madrid, España.
- Fitter, A., Hay, R. (2002). *Environmental Physiology of Plants*. York, Reino Unido: Copyright.
- García, L. J. (2004). *Caracterización de las respuestas fisiológicas y bioquímicas en tres clones de cacao (Theobroma cacao L.) sometidos a diferentes niveles de déficit hídrico* (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá - Colombia.
- Garzón, A. y Paulin, D. (2006). El desarrollo vegetativo de clones de cacao procedentes de embriogénesis somática. INIAP – Ecuador.
- Gramlich, A.; Tandy, S.; Gauggel, C.; Lopez, M.; Perla, D.; Gonzalez, V. y Schulin, R. (2016). Soil cadmium uptake by cocoa in Honduras. *18th International Conference on Heavy Metals in the Environment*.

- Hirsch RE, Lewis BD, Spalding EP, Sussman MR (1998) Un papel para el canal de potasio AKT1 en nutrición de las plantas. *Science* 280: 918-921.
- Huamaní, H., Huauya, M., Mansilla, L., Florida, N. y Neira, G. (2012). Presencia de metales pesados en cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) orgánico. *Acta agronómica*, 61 (4): 339 – 344.
- Jiménez, T. C. S., (2015). Estado legal mundial del cadmio en cacao (*Theobroma cacao*): fantasía o realidad. *Producción + Limpia*, 10 (1), 89-104.
- Kabata-Pendias, A. 2000. Trace elements in soils and plants. 3th Edition. CRC Press, Boca Raton, EE.UU. 413 p.
- Martínez, G., Palacio, C. (2010). *Determinación de metales pesados cadmio y plomo en suelos y granos de cacao frescos y fermentados mediante espectroscopía de absorción atómica de llama* (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Colombia.
- Nava, R. C. y Méndez, A. M. (2011). Efectos neurotóxicos de metales pesados (cadmio, plomo, arsénico y talio). *Arch Neurocién*, 16 (3), 140-147.
- Prieto, M. J., González, R. C., Román, G. A. y Prieto, G. F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29 - 44.
- Ramos, I., Esteban E., Lucena, J.J., Gárate, A. (2002). La absorción de cadmio y distribución subcelular en las plantas de *Lactuca* sp. Interacción Cd-Mn. *Plant Sci*. 162: 761 -767.

- Rivetta, A., Negrini, N., Cocucci, M. (1997). La participación de Ca^{2+} - calmodulina en Cd^{2+} toxicidad durante las primeras fases de rábano (*Raphanus sativus* L.) germinación de la semilla. *Plant Cell Environ.* 20: 600-608.
- Sanità di Toppi L., Gabbrielli, R. (1999) Respuesta al cadmio en las plantas superiores. *Environmental Experimental Botany* 41: 105-130
- Saverbeck, D.R. & A. Hein. (1991). The Ni uptake from different soils and its prediction by chemical extractions. *Water, Air Soil Pollut.* 58: 861-871.
- Smith, S.R. (1994). Effect of soil pH on availability to crops of metals in sewage sludge -treated soils. I. Ni, Cu and Zn uptake and toxicity to Reygrass. *Environ. Pollut.* 85:321-327.
- Solano, M. A. M., (2005). *Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por la hidrometalurgia del cinc* (Tesis doctoral). Universidad de Murcia, España.
- Vera, B. (1974). *Influencia de la sequía fisiológica en el desarrollo y nutrición de genotipos contrastados de cacao* (Tesis de posgrado). Universidad de Turrialba, Costa Rica.
- Yang MG, Lin XY, Yang XE (1998) Impacto de Cd en el crecimiento y acumulación de nutrientes diferentes especies de plantas. *Barbilla. J. Appl. Ecol.* 19: 89-94.

ANEXOS

Anexo 1: Diseño de ordenamiento de la siembra por genotipo

57	64	93		27	75	47		22	3	23	
101	26	59		17	68	66		107	48	119	
88	86	113		5	90	52		50	45	61	
58	1	33		54	44	37		65	79	96	
35	30	118		112	18	108		62	74	60	
19	21	40		51	6	34		111	4	7	
38	76	82		95	2	84		9	103	31	
71	72	98		29	20	46		63	78	70	
77	106	42		117	110	116		115	25	91	
94	69	56		87	36	99		73	28	39	
100	49	13		102	15	12		114	97	53	
83	16	89		43	80	67		11	92	120	
104	14	85		81	105	10		8	55	109	
	41				32				24		

Genotipos	N° de plantas
IMC-67	1 - 20
POUND-12	21 - 40
SCA-6	41 - 60
EET-400	61 - 80
CCN-51	81 - 100
Cacao común	101 - 120

Anexo 2: Análisis de varianza de altura de planta a los 35, 65, 80, 95 y 110 días

Altura de planta	F.V.	g.l.	S.C.	C.M.	F	P-valor	Signif.
35 días	Cd	1	5,38	5,3763	1,2408	0,2681	*
	Pb	1	0,03	0,0333	0,0077	0,9303	
	Genotipo	5	137,69	27,5371	6,3555	3,87E-05	
	Cd x Pb	1	6,44	6,4403	1,4864	0,2258	
	Cd x Genotipo	5	7,68	1,5361	0,3545	0,8782	
	Pb x Genotipo	5	19,76	3,9515	0,912	0,4767	
	Cd x Pb x Genotipo	5	19,85	3,9697	0,9162	0,474	
	Error	96	415,95	4,3328			
	Total	119					
65 días	Cd	1	2,79	2,791	0,2734	0,6022384	*
	Pb	1	1,66	1,657	0,1623	0,6879165	
	Genotipo	5	292,34	58,468	5,7287	0,0001142	
	Cd x Pb	1	8,69	8,694	0,8519	0,3583426	
	Cd x Genotipo	5	22,1	4,419	0,433	0,8245685	
	Pb x Genotipo	5	46,35	9,27	0,9083	0,4790959	
	Cd x Pb x Genotipo	5	34,37	6,874	0,6735	0,6445185	
	Error	96	979,78	10,206			
	Total	119					
80 días	Cd	1	12,03	12,033	0,7239	0,396973	*
	Pb	1	0,16	0,161	0,0097	0,921726	
	Genotipo	5	310,69	62,138	3,7383	0,003899	
	Cd x Pb	1	18,25	18,252	1,0981	0,297324	
	Cd x Genotipo	5	48,77	9,754	0,5868	0,710037	
	Pb x Genotipo	5	95,65	19,131	1,1509	0,33912	
	Cd x Pb x Genotipo	5	68,02	13,604	0,8184	0,539475	
	Error	96	1595,72	16,622			
	Total	119					
95 días	Cd	1	23,06	23,0563	1,0963	0,2977	
	Pb	1	9,08	9,075	0,4315	0,5128	
	Genotipo	5	100,47	20,0937	0,9555	0,4491	
	Cd x Pb	1	0,74	0,7363	0,035	0,852	
	Cd x Genotipo	5	73,01	14,6013	0,6943	0,629	
	Pb x Genotipo	5	1185	23,7008	1,127	0,3514	
	Cd x Pb x Genotipo	5	59,17	11,8337	0,5627	0,7283	
	Error	96	2018,9	21,0302			
	Total	119					
110 días	Cd	1	35,21	35,208	1,3628	0,2459	
	Pb	1	0,68	0,675	0,0261	0,8719	
	Genotipo	5	149,78	29,956	1,1595	0,3348	
	Cd x Pb	1	1,41	1,408	0,0545	0,8159	
	Cd x Genotipo	5	132,47	26,493	1,0255	0,4071	
	Pb x Genotipo	5	114,3	22,86	0,8848	0,4944	
	Cd x Pb x Genotipo	5	158,99	31,797	1,2308	0,3007	
	Error	96	2480,14	25,835			
	Total	119					

* Significativo al 5 % con el test F.

Anexo 3: Análisis de varianza de diámetro de tallo a los 35, 65, 80, 95 y 110 días

Diámetro de tallo	F.V.	g.l.	S.C.	C.M.	F	P-valor	Signif.
35 días	Cd	1	0,1021	0,10208	1,3116	0,255	*
	Pb	1	0,0141	0,01408	0,1809	0,6715	
	Genotipo	5	9,7084	1,94168	24,9467	4,97E-16	
	Cd x Pb	1	0,0008	0,00075	0,0096	0,922	
	Cd x Genotipo	5	0,0704	0,01408	0,1809	0,9692	
	Pb x Genotipo	5	0,1864	0,03728	0,479	0,7911	
	Cd x Pb x Genotipo	5	0,1137	0,02275	0,2923	0,9162	
	Error	96	7,472	0,07783			
	Total	119					
65 días	Cd	1	0,4941	0,4941	1,6033	0,2085	*
	Pb	1	0,0101	0,0101	0,0327	0,8568	
	Genotipo	5	18,3158	3,6632	11,8869	5,82E-09	
	Cd x Pb	1	0,0007	0,0007	0,0024	0,9608	
	Cd x Genotipo	5	1,3784	0,2757	0,8946	0,488	
	Pb x Genotipo	5	0,3644	0,0729	0,2365	0,9455	
	Cd x Pb x Genotipo	5	0,8057	0,1611	0,5229	0,7584	
	Error	96	29,584	0,3082			
	Total	119					
80 días	Cd	1	0,019	0,01875	0,0562	0,8131	*
	Pb	1	0,091	0,09075	0,272	0,6032	
	Genotipo	5	13,436	2,68715	8,0534	2,24E-06	
	Cd x Pb	1	0,014	0,01408	0,0422	0,8377	
	Cd x Genotipo	5	1,446	0,28915	0,8666	0,5066	
	Pb x Genotipo	5	1,022	0,20435	0,6124	0,6906	
	Cd x Pb x Genotipo	5	0,73	0,14608	0,4378	0,8211	
	Error	96	32,032	0,33367			
	Total	119					
95 días	Cd	1	0,07	0,0701	0,144	0,7052	*
	Pb	1	0,574	0,5741	1,1794	0,2802	
	Genotipo	5	23,181	4,6363	9,525	2,11E-07	
	Cd x Pb	1	0,331	0,3307	0,6795	0,4118	
	Cd x Genotipo	5	3,391	0,6783	1,3935	0,2336	
	Pb x Genotipo	5	1,561	0,3123	0,6416	0,6685	
	Cd x Pb x Genotipo	5	2,639	0,5278	1,0842	0,3741	
	Error	96	46,728	0,4868			
	Total	119					
110 días	Cd	1	0,016	0,01633	0,0268	0,870197	*
	Pb	1	0,901	0,90133	1,4814	0,226533	
	Genotipo	5	10,274	2,0548	3,3773	0,007459	
	Cd x Pb	1	0,56	0,56033	0,921	0,339631	
	Cd x Genotipo	5	4,92	0,98393	1,6172	0,16279	
	Pb x Genotipo	5	1,535	0,30693	0,5045	0,77221	
	Cd x Pb x Genotipo	5	1,534	0,30673	0,5042	0,772456	
	Error	96	58,408	0,60842			
	Total	119					

* Significativo al 5 % con el test F.

Anexo 4: Análisis de varianza de número de hojas a los 35, 65, 80, 95 y 110 días

Número de hojas	F.V.	g.l.	S.C.	C.M.	F	P-valor	Signif.
35 días	Cd	1	0,3	0,3	0,377	0,54069	*
	Pb	1	0,3	0,3	0,377	0,54069	
	Genotipo	5	11,867	2,37333	2,9822	0,01515	
	Cd x Pb	1	1,633	1,63333	2,0524	0,15522	
	Cd x Genotipo	5	5,8	1,16	1,4576	0,21094	
	Pb x Genotipo	5	5	1	1,2565	0,28912	
	Cd x Pb x Genotipo	5	2,667	0,53333	0,6702	0,64701	
	Error	96	76,4	0,79583			
	Total	119					
65 días	Cd	1	6,07	6,075	1,6682	0,1996	*
	Pb	1	9,07	9,075	2,492	0,11772	
	Genotipo	5	41,04	8,2083	2,254	0,05507	
	Cd x Pb	1	0,41	0,4083	0,1121	0,73846	
	Cd x Genotipo	5	1,18	0,235	0,0645	0,9971	
	Pb x Genotipo	5	15,18	3,035	0,8334	0,52912	
	Cd x Pb x Genotipo	5	20,24	4,0483	1,1117	0,35938	
	Error	96	349,6	3,6417			
	Total	119					
80 días	Cd	1	11,41	11,4083	1,148	0,2867	
	Pb	1	1,01	1,0083	0,1015	0,7508	
	Genotipo	5	93,64	18,7283	1,8846	0,1041	
	Cd x Pb	1	0,41	0,4083	0,0411	0,8398	
	Cd x Genotipo	5	23,44	4,6883	0,4718	0,7964	
	Pb x Genotipo	5	36,44	7,2883	0,7334	0,6001	
	Cd x Pb x Genotipo	5	32,44	6,4883	0,6529	0,66	
	Error	96	954	9,9375			
	Total	119					
95 días	Cd	1	20,83	20,833	1,7781	0,18554	*
	Pb	1	0,03	0,033	0,0028	0,95757	
	Genotipo	5	205,17	41,033	3,5021	0,00596	
	Cd x Pb	1	5,63	5,633	0,4808	0,48974	
	Cd x Genotipo	5	24,37	4,873	0,4159	0,83665	
	Pb x Genotipo	5	25,37	5,073	0,433	0,82456	
	Cd x Pb x Genotipo	5	34,17	6,833	0,5832	0,71275	
	Error	96	1124,8	11,717			
	Total	119					
110 días	Cd	1	19,2	19,2	1,1607	0,28402	*
	Pb	1	17,63	17,633	1,066	0,30445	
	Genotipo	5	188,37	37,673	2,2775	0,05285	
	Cd x Pb	1	0,13	0,133	0,0081	0,92865	
	Cd x Genotipo	5	35	7	0,4232	0,83154	
	Pb x Genotipo	5	107,37	21,473	1,2981	0,27118	
	Cd x Pb x Genotipo	5	62,27	12,453	0,7528	0,58602	
	Error	96	1588	16,542			
	Total	119					

* Significativo al 5 % con el test F.

Anexo 5: Análisis de varianza del área foliar y radicular

ANOVA de área	F.V.	g.l.	S.C.	C.M.	F	P-valor	Signif.
Foliar	Genotipo	5	102087	20417,3	2,4863	0,03662	*
	Cadmio	1	3524	3524,4	0,4292	0,51396	
	Plomo	1	11301	11301,1	1,3762	0,24366	
	Genotipo x Cd	5	42934	8586,7	1,0456	0,39555	
	Genotipo x Pb	5	16086	3217,1	0,3918	0,8534	
	Cd x Pb	1	1466	1466,4	0,1786	0,67355	
	Genotipo x Cd x Pb	5	14324	2864,8	0,3489	0,88184	
	Error	96	788352	8212			
	Total	119					
Raíz	Genotipo	5	31939	6387,8	12,8484	1,44E-09	*
	Cadmio	1	4	3,9	0,0079	0,9294	
	Plomo	1	1289	1289,3	2,5933	0,1106	
	Genotipo x Cd	5	2892	578,3	1,1633	0,3329	
	Genotipo x Pb	5	2040	408	0,8207	0,5379	
	Cd x Pb	1	13	13,5	0,0271	0,8696	
	Genotipo x Cd x Pb	5	1971	394,1	0,7928	0,5575	
	Error	96	47728	497,2			
	Total	119					

* Significativo al 5 % con el test F.

Anexo 6: Análisis de varianza de materia seca foliar y raíz

Materia seca	F.V.	g.l.	S.C.	C.M.	F	P-valor	Signif.
Foliar	Genotipo	5	32,769	6,5539	10,3462	5,89E-08	*
	Cadmio	1	1,296	1,2958	2,0457	0,1559	
	Plomo	1	0,000	0,0002	0,0003	0,9863	
	Genotipo x Cd	5	6,044	1,2087	1,9081	0,1	
	Genotipo x Pb	5	1,311	0,2622	0,4138	0,8381	
	Cd x Pb	1	0,604	0,6035	0,9527	0,3315	
	Genotipo x Cd x Pb	5	2,017	0,4034	0,6369	0,6721	
	Error	96	60,812	0,6335			
	Total	119					
Raíz	Genotipo	5	11,4413	2,28826	9,1949	3,55E-07	*
	Cadmio	1	0,0008	0,00075	0,003	0,9563	
	Plomo	1	0,1442	0,14421	0,5795	0,4484	
	Genotipo x Cd	5	0,8494	0,16988	0,6826	0,6377	
	Genotipo x Pb	5	0,8788	0,17575	0,7062	0,6201	
	Cd x Pb	1	0,1129	0,11285	0,4535	0,5023	
	Genotipo x Cd x Pb	5	0,6494	0,12988	0,5219	0,7592	
	Error	96	23,8907	0,24886			
	Total	119					

* Significativo al 5 % con el test F.

Anexo 7: Análisis de varianza de Cadmio de la parte foliar y raíz

Análisis Cadmio	F.V.	g.l.	S.C.	C.M.	F	P-valor	Signif.
Foliar	Genotipo	5	392,4	78,5	12,642	1,94E-09	*
	Cadmio	1	1937,7	1937,7	312,157	< 2E-16	*
	Plomo	1	138,2	138,2	22,259	8,09E-06	*
	Genotipo x Cd	5	176,5	35,3	5,688	0,000123	*
	Genotipo x Pb	5	613,7	122,7	19,774	1,69E-13	*
	Cd x Pb	1	48,8	48,8	7,869	0,006088	*
	Genotipo x Cd x Pb	5	739,0	147,8	23,812	1,69E-15	*
	Error	96	595,9	6,2			
	Total	119					
Raíz	Genotipo	5	115,06	23,01	18,406	8,90E-13	*
	Cadmio	1	148,83	148,83	119,042	< 2E-16	*
	Plomo	1	2,41	2,41	1,928	0,16818	
	Genotipo x Cd	5	64,62	12,92	10,336	5,98E-08	*
	Genotipo x Pb	5	23,78	4,76	3,805	0,00346	*
	Cd x Pb	1	2,17	2,17	1,732	0,19130	
	Genotipo x Cd x Pb	5	16,47	3,29	2,634	0,02817	*
	Error	96	120,03	1,25			
	Total	119					

* Significativo al 5 % con el test F.

Anexo 8: Análisis de varianza de Plomo de la parte foliar y raíz

Análisis Plomo	F.V.	g.l.	S.C.	C.M.	F	P-valor	Signif.
Foliar	Genotipo	5	24360	4872	3,232	0,009678	*
	Cadmio	1	140	140	0,093	0,761408	
	Plomo	1	43666	43666	28,969	5,20E-07	*
	Genotipo x Cd	5	45402	9080	6,024	6,84E-05	*
	Genotipo x Pb	5	38994	7799	5,174	0,000302	*
	Cd x Pb	1	41	41	0,027	0,869229	
	Genotipo x Cd x Pb	5	41670	8334	5,529	0,000162	*
	Error	96	144701	1507			
	Total	119					
Raíz	Genotipo	5	19,045	3,809	15,859	2,47E-11	*
	Cadmio	1	0,256	0,256	1,066	0,304377	
	Plomo	1	20,386	20,386	84,880	7,95E-15	*
	Genotipo x Cd	5	11,642	2,328	9,695	1,67E-07	*
	Genotipo x Pb	5	8,341	1,668	6,945	1,44E-05	*
	Cd x Pb	1	3,460	3,460	14,408	0,000259	*
	Genotipo x Cd x Pb	5	1,968	0,394	1,639	0,157189	
	Error	96	22,817	0,240			
	Total	119					

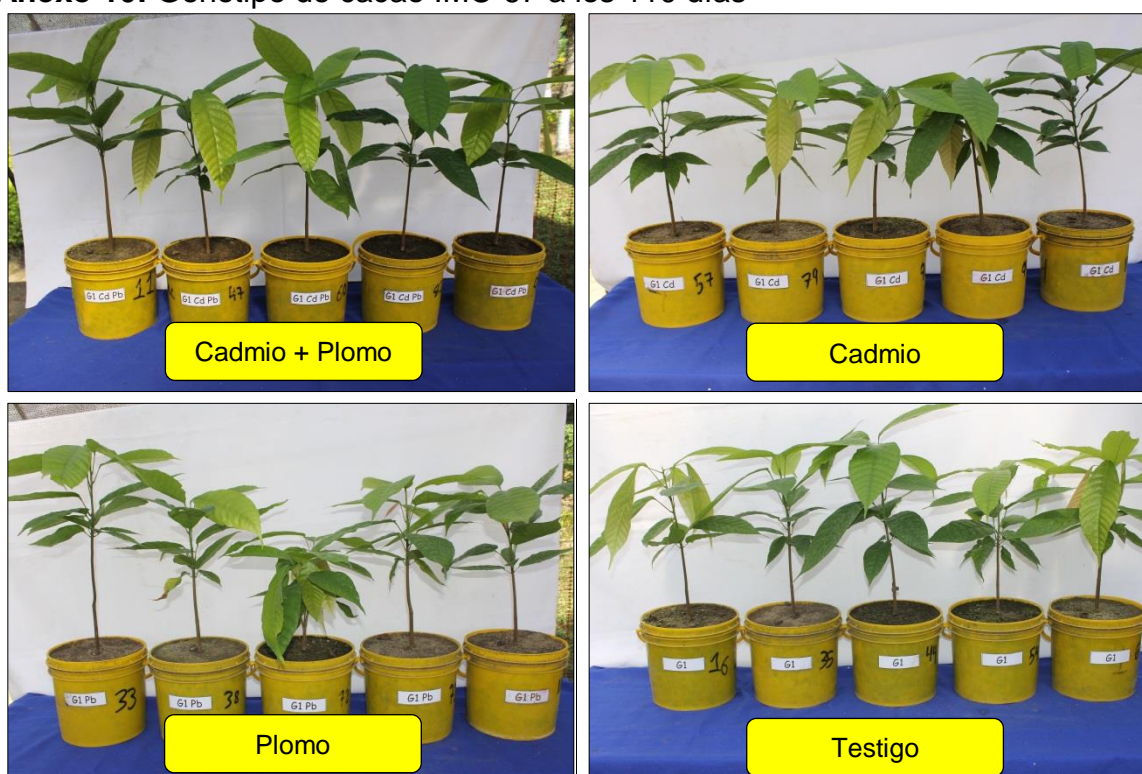
* Significativo al 5 % con el test F.

Anexo 9: Análisis de varianza de la parte raíz por la parte aérea

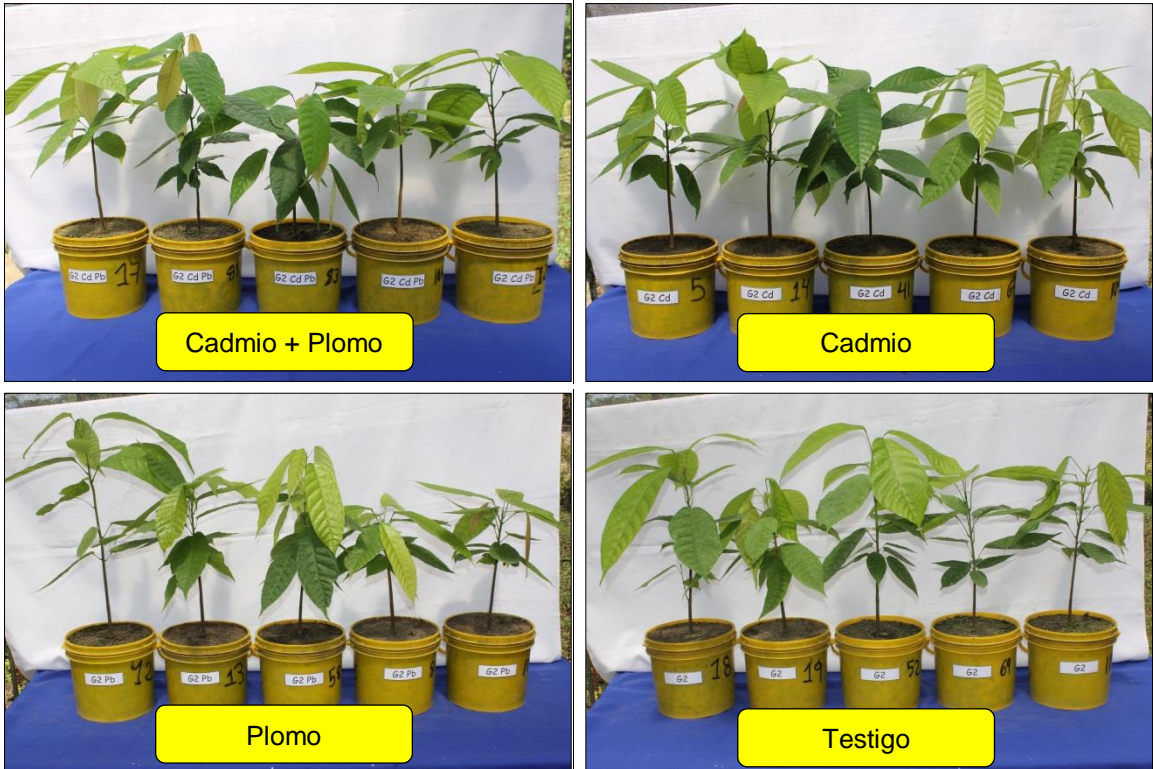
ANOVA	F.V.	g.l.	S.C.	C.M.	F	P-valor	Signif.
Análisis Cadmio	Parte	1	1231	1231,0	49,54	3,44E-11	*
	Error	190	4721	24,8			
Análisis Plomo	Parte	1	18150	18150	9,107	0,0029	*
	Error	190	378686	1993			

* Significativo al 5 % con el test F.

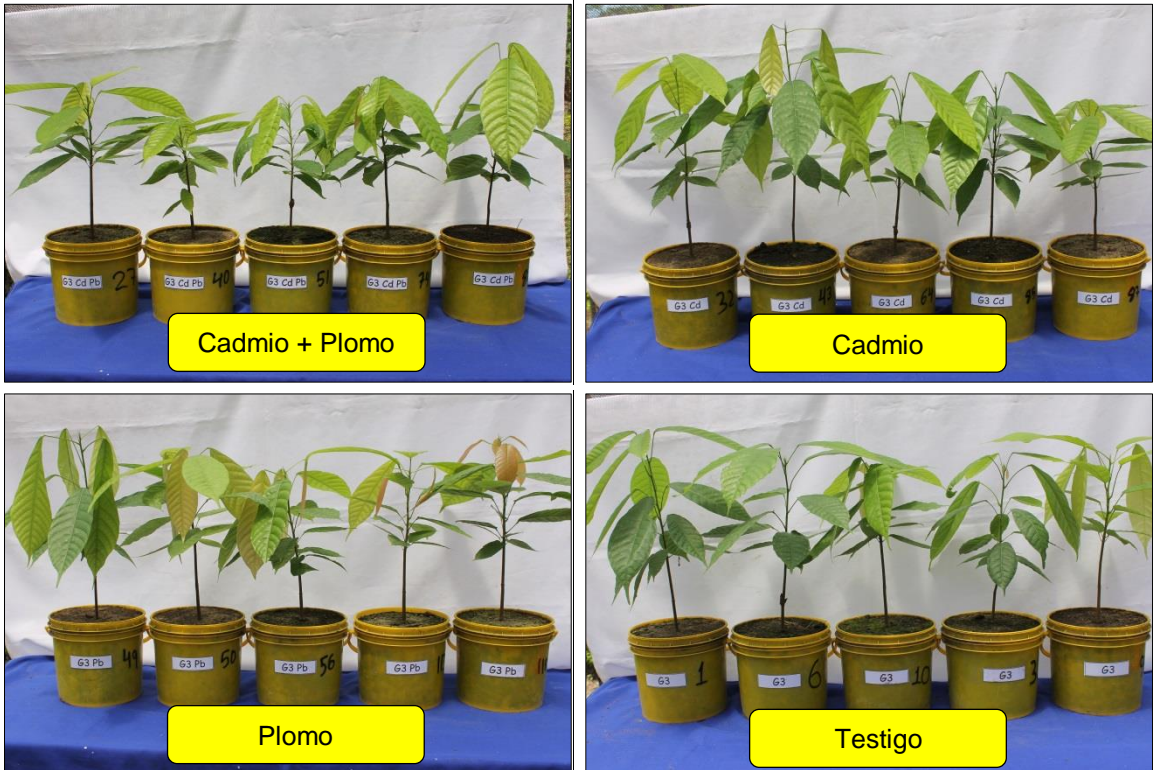
Anexo 10: Genotipo de cacao IMC-67 a los 110 días



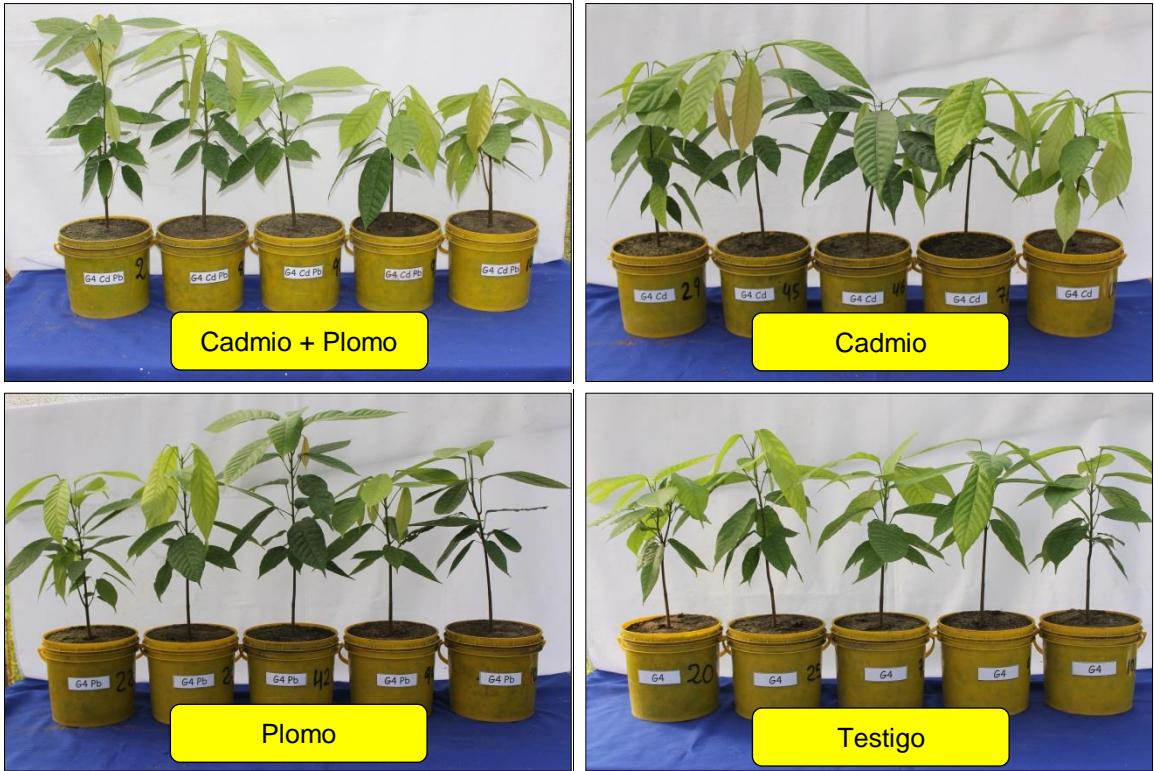
Anexo 11: Genotipo de cacao POUND-12 a los 110 días



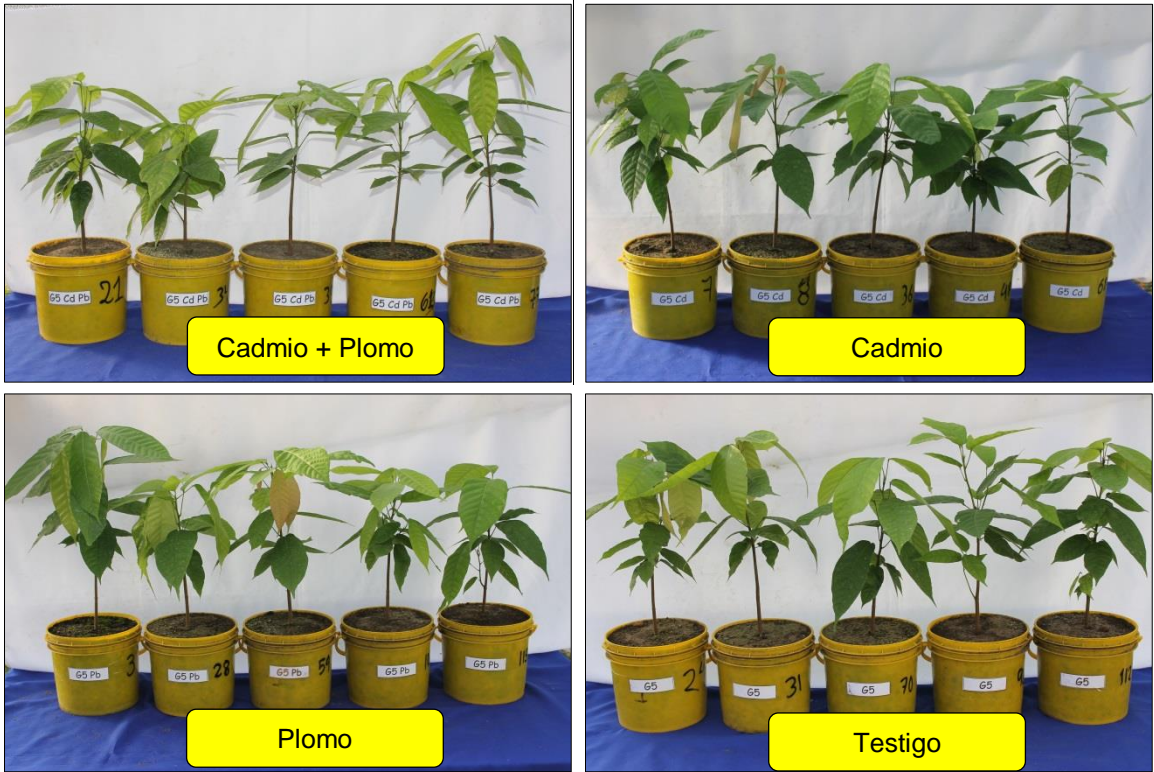
Anexo 12: Genotipo de cacao SCA-6 a los 110 días



Anexo 13: Genotipo de cacao EET-400 a los 110 días



Anexo 14: Genotipo de cacao CCN-51 a los 110 días



Anexo 15: Cacao común a los 110 días

